

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR INGÉNIEUR

PAR

PAUL SASPORTES

1^{er} SUJET. — Contribution à l'étude de l'influence du calcium, du fer et de l'aluminium sur la transformation du phosphore minéral en phosphore organique.

2^{ème} SUJET. — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le

1968

devant la Commission d'examen.

M. DUCHAUFOR Président.

M. JACQUIN

M. MAYAUDON

} Examineurs.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR INGÉNIEUR

PAR

PAUL SASPORTES



1^{er} SUJET. — Contribution à l'étude de l'influence du calcium, du fer et de l'aluminium sur la transformation du phosphore minéral en phosphore organique.

2^{ème} SUJET. — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le

devant la Commission d'examen.

M. DUCHAUFOUR Président.

M. JACQUIN

M. MAYAUDON

} Examineurs.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

PAR

PAUL BARRON



1^{er} SUJET — Contribution à l'étude de l'influence du calcium du foie et de l'aluminium sur la transformation du phosphate minéral en phosphate organique

2^{ème} SUJET — Propriétés de décoloration par la lumière

Présenté le 10 mai 1900 devant la Commission d'examen.

Reçu par le

M. GUCHAUBOUR, Président

M. JACQUIN

Examinateur

M. MAYAUDON

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR INGÉNIEUR

PAR

PAUL SASPORTES

1^{er} SUJET. — Contribution à l'étude de l'influence du calcium, du fer et de l'aluminium sur la transformation du phosphore minéral en phosphore organique.

2^{ème} SUJET. — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le devant la Commission d'examen.

M. DUCHAUFOUR Président.

M. JACQUIN

M. MAYAUDON

} Examineurs.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

PAR

PAUL SASPORTES

Digitized by the Internet Archive
in 2026



1^{er} SUJET. — Contribution à l'étude de l'influence du calcium, du fer et de l'aluminium sur la transformation du phosphate minéral en phosphate organique.
2^{ème} SUJET. — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le devant la Commission d'examen.

M. DUCHAUFOUT, Président.

M. JACQUIN

Examinateur.

M. MAYAUDON

FACULTE DES SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE
N A N C Y

Doyen : M. AUBRY

Assesseur : M. GAY

Doyens honoraires : MM. CORNUBERT - DELSARTE - ROUBAULT

Professeurs honoraires : MM. RAYBAUD - LAFFITTE - LERAY - JULY -
LAPORTE - EICHORN - GODEMENT - DUBREUIL - L. SCHWARTZ - DIEUDONNE -
DE MALLEMANN - LONGCHAMBON - LETORT - DODE - GAUTHIER - GOUDET -
OLMER - CORNUBERT - CHAPELLE - GUERIN - WAHL

Maîtres de conférences honoraires : MM. LIENHART - PIERRET

Professeurs

MM. DELSARTE	Analyse supérieure	MM. MANGENOT	Botanique
ROUBAULT	Géologie	GAYET	Physiologie
CHAPPELLE	Mécanique rationnelle	HADNI	Physique
VEILLET	Biologie animale	* BASTICK	Chimie
BARRIOL	Chimie théorique	DUCHAUFOR	Pédologie
BIZETTE	Physique	GARNIER	Agronomie
GUILLIEN	Electronique	NEEL	Chimie organique indus- trielle.
GIBERT	Chimie physique	BERNARD	Géologie appliquée
LEGRAS	Mécanique rationnelle	* CHAMPIER	Physique
BOLFA	Minéralogie	* GAY	Chimie biologique
NICLAUSE	Chimie	STEPHAN	Zoologie
FAIVRE	Physique appliquée	* CONDE	Zoologie
AUBRY	Chimie minérale	* WERNER	Botanique
COPPENS	Radiogéologie	EYMARD	Calcul différentiel et intégral.
DUVAL	Chimie	LEVISALLES	Chimie organique
FRUHLING	Physique	Mme HERVE	Méthodes mathématiques de la physique.
HILLY	Géologie	FELDEN	Physique
LE GOFF	Génie chimique	* GOSSE	Mécanique physique
SUHNER	Physique expérimentale	* DAVOINE	Physique (E.N.S.M.I.M)
CHAPON	Chimie biologie	HORN	Physique 1er cycle
HEROLD	Chimie minérale industrielle	* Mme LUMER	Mathématiques
SCHWARTZ B	Exploitation minière		
* MALAPRADE	Chimie		
		N....	Chimie biologique
		N....	Mécanique appliquée

(*) Professeur titulaire à titre personnel.

.... / ...

Maîtres de conférences

Mme BASTICK	Chimie P.C. Epinal
MM. GUDEFIN	Physique
ROCCI	Géologie
VUILLAUME	Psychophysiologie
FRENTZ	Biologie animale
MARI	Chimie (I.S.I.N.)
AUROUZE	Géologie
DEVIOT	Physique du solide
FLECHON	Physique P.C.
Mle HUET	Mathématique C.B.G
VIGNES	Métallurgie
BALESDENT	Thermodynamique chimique appliquée (E.N.S.I.C)
BLAZY	Minéralogie appliquée (E.N.S.G.)
JANOT	Physique P.C. Epinal
JACQUIN	Pédologie et chimie agricoles
MAINARD	Physique M.P
CACHAN	Entomologie appliquée (E.N.S.A.)
MARTIN	Chimie P.C
PAULMIER	Mécanique expérimentale
PROTAS	Minéralogie
JOZEFOWICZ	Physico-chimie
JURAIN	Géologie G.B.G
RIVAIL	Chimie appliquée (C.U.C.E.S)
VILLERMAUX	Génie chimique
METCHE	Biochimie appliquée (Brasserie)
PAIR	Mathématiques appliquées
BAUMANN	Physique 1er cycle
DURAND	Physique
GRANGE	Physique (I.S.I.N.)
N...	Mécanique des fluides (I.S.I.N.)
N...	Mécanique (I.S.I.N)
N...	Probabilités et statistiques
N...	Mathématiques
N...	Mathématiques P.C.
N...	Mathématiques C.B.G.
N...	Physiologie animale
N...	Mathématiques M.P.
N...	Exploitation minière (E.N.S.M.IM.)

I - I N T R O D U C T I O N

I - INTRODUCTION -

La relation entre le phosphore organique et le phosphore minéral est très variable suivant les sols. Le phosphore organique est inclus soit dans la matière organique fraîche, c'est à dire dans les débris végétaux, soit dans la matière organique transformée ou humus. Les études sur le phosphore organique peuvent se diviser en trois catégories :

- celles qui traitent des taux et de leurs corrélations possibles avec différents caractères analytiques du sol, (Goring 1953 - Barrow 1961 - Nye et Bertheux 1957 - San Gupta et Cornfield 1962 - Pratt 1963 - Kaila 1963 - John et al 1965)

- celles qui étudient la nature des composés, (Anderson 1961 - Dormaar 1963 - Cosgrove 1963 - Martin et al 1964 - Nehring et al 1966 - Wild 1966)

- celles qui recherchent l'importance de ce phosphore organique dans l'alimentation des plantes, soit par sa minéralisation, soit au contraire par l'immobilisation biologique du phosphore minéral. (Jackman 1954 - Thompson, Black, Zoellner 1954)

Ces différentes études font presque toutes intervenir l'influence du pH ou les teneurs en sesquioxydes des sols analysés.

Ces mêmes facteurs ont une grande importance sur l'état du phosphore minéral dans le sol. En effet, les ions PO_4^{---} peuvent être , soit en solution dans l'eau du sol, soit retenus à la surface de colloïdes électropositifs, les hydroxydes de fer et d'aluminium, ou à la surface des argiles grâce aux ions Ca^{++} et Al^{+++} .

Cette importance du calcium, du fer et de l'aluminium démontrée dans de très nombreuses recherches sur le phosphore nous a conduit à préciser l'influence de ces trois cations sur l'une des phases de son évolution : sa transformation en phosphore organique. Le phos-

.../...

phore radioactif utilisé comme marqueur nous a permis de suivre l'immobilisation biologique alors que, jusque là, les études se bornaient le plus souvent à comparer les teneurs en phosphore organique des sols. On notait donc la résultante de deux phénomènes contraires : synthèse et minéralisation. Pour évaluer cette immobilisation biologique, nous avons du, tout d'abord, déterminer le plus exactement possible les quantités de phosphore assimilable par les microorganismes, résultat obtenu ici aussi par l'utilisation du P^{32} . La dernière partie de notre travail, consacrée à l'influence du calcium, du fer et de l'aluminium sur le métabolisme du phosphore dans l'orge, a pour but de compléter cette étude en examinant l'influence de ces trois cations sur la deuxième source possible de phosphore organique : les débris végétaux.

2 - PHOSPHORE ASSIMILABLE

2 - PHOSPHORE ASSIMILABLE -

2-1 RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

2-1-1 Etat du phosphore minéral dans le sol

On peut représenter les équilibres du P minéral dans le sol comme suit :

P en solution $\longleftrightarrow$ P adsorbé $\longleftrightarrow$ P rétrogradé participant aux échanges dans certaines conditions.

Le phosphore en solution ne représente qu'une très faible partie du phosphore minéral. Les anions PO_4^{---} sont en effet adsorbés par les argiles grâce aux ions Ca^{++} et Al^{+++} et par les hydroxydes colloïdaux de fer et d'aluminium. Ces ions adsorbés sont en équilibre avec le phosphore en solution et peuvent ainsi renouveler la solution du sol appauvrie par la nutrition des plantes. La fixation de ces ions se produit pour diverses raisons : précipitation sous forme de phosphates de fer et d'aluminium en milieu très acide, inclusion lors de la réorganisation des molécules des colloïdes qui évoluent vers des formes cristallines (Duchaufour 1965).

De nombreux auteurs ont cherché à établir l'importance et l'évolution de ces différentes formes (P lié au calcium, au fer, ou à l'aluminium que nous désignerons symboliquement par P Ca, P Fe, P Al).

Dans les sols acides Chang et Chu (1962) constatent que l'apport d'engrais solubles augmente tout d'abord beaucoup plus P Al que P Fe et P Ca. Mais P Al évolue par la suite vers des formes liées au fer, P Ca vers des formes liées à l'aluminium et au fer. L'évolution vers P Fe est nettement plus importante en cas de submersion.

Fiskell et Spencer (1964), dans des études sur des sables fins de Lakeland, montrent l'influence des doses d'engrais apportés et d'un chaulage sur cette répartition. Le phosphore natif du sol était lié surtout au fer. De faibles apports provoquent une dominance très nette de P Al, les doses les plus fortes augmentent la proportion de P Fe et P Ca. Le chaulage diminue dans tous les cas P Al et P Fe et augmente P Ca. Manning et Salomon (1965) aboutissent aux mêmes

.../..

conclusions sur un sol de limon fin brun podzolique.

Par élimination de quantités croissantes de fer ou d'aluminium, Bronfield montre que, pour des sols acides, l'aluminium est le principal facteur dans l'adsorption du phosphore. Saini et Mac Lean (1965) trouvent également, pour des sols du nouveau Brunswick, que la rétention est due essentiellement à l'aluminium et qu'il n'y a aucun rapport avec les argiles et le fer. Au fur et à mesure que l'intensité du lessivage augmente dans le profil, Saunders (1965) remarque que la rétention du phosphore ainsi que Al et Fe, extraits au réactif de Tamm, diminuent dans la couche arable et augmentent dans le sous-sol.

Dans les sols neutres, Blanchet (1960) estime que P Ca représente environ 30 % du phosphore minéral, le reste existant surtout sous forme de P Al.

Au contraire, 60 à 90 % du phosphore, toujours d'après Blanchet (1960), se trouverait lié au calcium dans les sols calcaires, notamment dans les rendzines du Berry.

L'emploi du P^{32} a permis d'étudier avec plus de précision les équilibres du phosphore. Ainsi, Barbier (1954) a démontré clairement l'existence d'échanges permanents d'ions PO_4^{---} entre la solution du sol et le complexe adsorbant, mais également entre les différentes formes de phosphore (P Ca, P Al, P Fe). Ce phosphore mobile est appelé phosphore auto-diffusible. Pour les différents éléments du complexe adsorbant, on peut distinguer deux phases dans ces phénomènes d'auto-diffusion : une certaine partie des ions PO_4^{---} s'échangent très rapidement, puis le processus se ralentit pour atteindre l'équilibre beaucoup plus lentement. Nous pouvons déjà noter l'importance de la phase rapide quant à l'alimentation des plantes. Le phosphore isotopiquement diluable en un temps court indique, en effet, la faculté qu'a le sol de rétablir rapidement l'équilibre P en solution $\rightleftharpoons$ P adsorbé.

.../...

Différents facteurs interviennent sur cette autodiffusion. Blanchet et Chaumont (1964), étudiant les phénomènes de désorption et de diffusion, ont montré l'influence du pouvoir adsorbant : plus celui-ci est élevé, plus la désorption est lente et limitée ; il représente aussi l'essentiel du potentiel électrochimique déterminant le mouvement des ions phosphates. Barbier (1965) a montré que le chaulage d'un sol acide jusqu'à saturation diminue la concentration des ions PO_4^{---} en solution, mais augmente la quantité de phosphore rapidement échangeable. Il en est de même lors de l'acidification par des engrais ammoniacaux d'un sol naturellement neutre jusqu'à un pH de 3,5. Talibudeen et Arambarri (1964) ont mis en évidence l'influence des quantités et de l'origine des carbonates de calcium sur le phosphore isotopiquement échangeable. La décalcarification (Barbier et Haas Arpadne 1962) n'altérerait sensiblement pas le pouvoir adsorbant, mais libérerait une quantité importante d'ions PO_4^{---} qui participent alors aux équilibres de dissolution entre solide et liquide.

D'autres études permettent également de préciser quelles sont les différentes formes de phosphates susceptibles de participer le plus activement à la nutrition de végétaux. Dunbar et Baker 1965, étudiant des sols acides, estiment que la rapidité avec laquelle le P^{32} atteint son équilibre avec le phosphore des extraits à $NH_4 F$ indiquerait que cette fraction est en étroite corrélation avec le phosphore assimilable de ces sols.

2-1-2 Méthodes de dosage du P assimilable

La nutrition phosphatée des plantes dépend essentiellement de trois facteurs :

- La réserve totale : Facteur QUANTITE
- La concentration de la solution du sol : FACTEUR
ACTIVITE
- La vitesse avec laquelle l'équilibre P en solution, P adsorbé est établi : Facteur MOBILITE

Les méthodes chimiques usuelles nécessitent souvent de très nombreux dosages afin de tenir compte de ces 3 facteurs. En effet, les unes sont basées sur l'estimation des réserves et se différencient

par la nature du réactif suivant les caractéristiques du pouvoir de rétention du sol, les autres essaient de déterminer le phosphore rapidement assimilable, c'est à dire l'activité des ions PO_4^{---} ou encore le potentiel électrochimique des ions adsorbés.

2-1-2-1 Estimation du facteur quantité

2-1-2-1-1 Méthode Dyer (à l'acide citrique) qui permet l'extraction de P Ca et d'une partie de P Al.

2-1-2-1-2 Méthode Joret et Hébert (à l'oxalate d'ammonium), et méthode de Truog (à l'acide sulfurique dilué) applicables aux terres calcaires.

2-1-2-1-3 Réactif de Bray n° 4 qui permet par l'utilisation d'un réactif acide (HCl) de solubiliser P Ca et une fraction de P Al, puis par un réactif alcalin (NH_4F) de solubiliser P Al et P Fe. Le même protocole est préconisé par Duchaufour et Bonneau, mais ces auteurs utilisent successivement l'acide sulfurique et la soude.

2-1-2-1-4 Cette extraction séparée des différentes formes de phosphore a été accentuée par Chang et Jackson (1957). Le phosphore retenu par les composés aluminiques, ferriques et calciques est dosé à la suite d'extractions successives à NH_4F , Na OH et H_2SO_4 . Hanotiaux (1964) a repris et précisé cette méthode.

2-1-2-2 Estimation des facteurs activité et mobilité

Ils sont notamment déterminés par la méthode Morgan-Barbier (acide acétique et acétate de sodium) qui donne un reflet de la concentration en ions PO_4^{---} dans la solution du sol et par le potentiel phosphate - $\text{I}/2 \text{ P Ca} + \text{P PO}_4\text{H}_2$ - qui indique l'état du phosphore du sol par la force avec laquelle le phosphore assimilable est retenu, comme la valeur P_F indique l'état de l'eau.

Chacune de ces deux estimations ne donne qu'une vue partielle du pouvoir alimentaire du sol. Blanchet (1963) préconise donc

.../...

l'établissement des trois données suivantes :

- le phosphore présumé assimilable extrait à l'oxalate d'ammonium qui présente l'avantage d'être applicable à de nombreux sols,
- la concentration de la solution du sol donnée par le phosphore désorbé à l'équilibre dans une solution de $\text{CaCl}_2\text{N}/100$ avec un rapport sol/solution de $1/4$,
- le pouvoir de rétention du sol obtenu par l'établissement d'une courbe d'adsorption après agitation de deux échantillons de sol dans des solutions de CaCl_2 ayant reçu deux apports différents de phosphore.

Ces trois données permettent alors de conduire la fumure phosphatée d'une manière raisonnée en tenant compte, toutefois, des possibilités de rétrogradation.

2-1-2-3 Utilisation du P^{32}

Le phosphore radioactif permet d'obtenir des données plus précises sur les facteurs quantité et mobilité et sur le pouvoir alimentaire du sol (notion tenant compte de tous les facteurs : Activité, quantité, Mobilité).

Valeurs : L - E

Nous avons vu la diversité des méthodes chimiques usuelles préconisées pour la détermination des réserves du sol. Cependant, aucune d'entre elles ne peut prétendre donner la quantité exacte du phosphore qui participe à l'équilibre : P de la solution $\rightleftharpoons$ P du sol. Larsen (1952) établit le moyen d'y parvenir grâce au phosphore radioactif. Après addition à un sol d'une quantité connue de P^{32} , sous une forme susceptible de se dissoudre dans le sol, il se produit un échange entre le P^{32} appliqué et le phosphore du sol suivant la réaction : P du sol $\rightleftharpoons$ P marqué de la solution. Le sol placé dans des vases de végétation est ensuite soumis à une extraction au moyen de plantes-test. Une fois l'équilibre établi entre les ions $\text{P}^{31}\text{O}_4^{---}$ et $\text{P}^{32}\text{O}_4^{---}$ de l'engrais avec les ions $\text{P}^{31}\text{O}_4^{---}$ du sol, la plante prélèvera au hasard des ions, c'est à dire dans la proportion où ils se trouvent dans

.../...

le sol. On a donc la relation $\frac{r}{n} = \frac{R}{X + L}$

r : radioactivité dans la plante

n : phosphore dans la plante

R : radioactivité introduite

X : phosphore apporté

L : phosphore du sol qui participe à l'équilibre ou phosphore labile.

Où : $L = (\frac{C_x}{C_p} - 1) X$ si on désigne par :

Cx : l'activité spécifique du phosphore ajouté = $\frac{R}{X}$

Cp : l'activité spécifique du phosphore de la plante

$$C_p = \frac{r}{n}$$

Scott Russel (1959) propose une méthode de laboratoire pour cette détermination. Après agitation d'un échantillon de sol avec une solution de phosphore marqué et une fois le stade d'équilibre atteint, la radioactivité spécifique du phosphore en solution permet d'obtenir une valeur E ou valeur d'échange qui représente la quantité d'ions isotopiquement échangeables durant l'expérience. En effet, la relation :

$$\frac{R}{E + X} = \frac{r}{n}$$

permet, comme précédemment, de déterminer E.

R : radioactivité introduite

E : P du sol isotopiquement échangeable

X : P ajouté

r : radioactivité de la solution

n : P en solution

$$E = (\frac{C_x}{C_c} - 1) X$$

Cx : radioactivité spécifique initiale du phosphore de la solution dans laquelle on a agité l'échantillon de terre : $\frac{R}{X}$

..../...

Cc : radioactivité spécifique de la solution après agi-
tation : $\frac{r}{m}$

Le rôle de la plante dans la méthode Larsen n'est que de prélever une fraction aliquote du mélange d'ions mobiles sur laquelle on dose r et m.

Notons, que si on utilise du P^{32} sans entraîneur, c'est à dire si la masse du phosphore ajouté est négligeable vis à vis du phosphore du sol, les relations précédentes se simplifient :

$$E \text{ ou } L = \frac{R}{m}$$

De nombreuses expériences (Andersen 1961 - Larsen 1965 - Baert 1965) ont montré que le phosphore labile n'est pas constant. Au cours de la période de végétation on remarque, dans les premiers mois, une augmentation de la valeur L. Au contraire, d'une expérience à l'autre, on note une diminution qui se produit par suite d'une modification du phosphate du sol pendant le stockage. De même L est plus faible quand on augmente le volume de sol alors que l'exportation est plus importante quand la quantité de sol diminue.

La quantité de phosphore demeurant sous forme labile et le rapport entre le phosphore minéral et le phosphore labile ont été mesurés pour de nombreux échantillons de sols d'Angleterre et d'Es-
cosse après des applications d'engrais phosphatés (Larsen et al 1965) :

- La valeur L varie indépendamment du phosphore minéral.
- Un certain niveau de phosphore labile est maintenu dans le sol lorsque la quantité de phosphore labile est diminuée à la suite, par exemple, d'une culture. Ce fait peut être lié à l'existence d'un équilibre entre le phosphore inerte et le phosphore labile.
- L'examen de la courbe de variation de L en fonction du temps des sols enrichis montre une décroissance exponentielle. Les "demi-périodes" (temps nécessaire pour que la moitié du phosphore appliqué soit immobilisé) varient de 1 à 9 ans sauf dans un cas où elle a été évaluée à 50 ou 60 ans. Le seul facteur en corrélation a été la concentration en ions H^+ . La diminution du phosphore labile pourrait donc résulter de la formation de phosphate de calcium cristallin à une vitesse

.../...

croissante avec le pH du sol.

La valeur L dépend également de la culture (Baert 1965). Sur quatre sols calcaires, le phosphore restant labile ou mobilisé après un apport d'engrais est plus important pour le trèfle que pour le ray-grass. Le trèfle prélevant beaucoup de calcium mobilise plus de phosphore non labile durant sa croissance que le ray-grass.

Cependant, Jélenic et Vajnberger (1964) trouvent que le phosphore labile, malgré sa variabilité, est en général en corrélation avec le rendement et l'absorption de phosphore par les plantes. Au contraire, les résultats obtenus par ces auteurs au moyen de réactifs tels que l'acide sulfurique montraient qu'en général les sols étaient pauvres en phosphore assimilable, ce qui n'était pas toujours vérifié par les rendements et l'absorption de phosphore.

Andersen (1961) constate également une relation linéaire entre L et la quantité totale de phosphore absorbé dans les sols n'ayant pas reçu d'engrais.

Virmani, Moulinier et Mazoyer (1966), utilisant la valeur E, remarquent que la méthode de la dilution isotopique semble donner des résultats en accord avec la réponse aux apports d'engrais et ceci indépendamment du type de sol alors qu'ils obtenaient une grande hétérogénéité par l'emploi de différentes méthodes chimiques d'extraction.

Toutefois, les valeurs L et E n'indiquent pas la quantité de phosphore assimilable, elles mesurent les réserves. Aussi, Blanchet propose l'indice I :

$$I = \left(\begin{array}{l} \text{Quantité de P isotopiquement} \\ \text{diluable en un temps court} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{l} \text{Concentration en phosphore} \\ \text{de la solution du sol} \end{array} \right)$$

Indice qui, faisant intervenir les trois facteurs du pouvoir alimentaire du sol, rendrait bien compte des résultats culturaux.

Gachon (1966) constate également que l'indice

$$I_E = E \times \frac{E}{E + F} \quad \text{ou} \quad I_L = L \times \frac{L}{L + F}$$

.../...

présente une corrélation très significative avec le phosphore prélevé par les végétaux.

E et L représentent le phosphore labile déterminé par agitation ou par l'intermédiaire des plantes.

F est la quantité de phosphore nécessaire pour élever la concentration de la solution du sol à un niveau de référence.

Valeur A

Les indices précédents permettent d'établir une classification des sols suivant la réaction des cultures aux engrais phosphatés mais non d'évaluer le phosphore assimilable. La méthode de Fried et Dean (1952) a pour but d'apprécier le pouvoir alimentaire du sol en déterminant la quantité d'un élément nutritif assimilable exprimée en unité d'un étalon.

Le concept de la valeur A est fondé sur l'hypothèse selon laquelle une plante en présence de deux sources différentes d'un élément nutritif absorbe cet élément dans chaque source en proportion directe des quantités assimilables dans ces deux sources. Pour que cette valeur A soit quantitative il faut que ces deux sources de l'élément nutritif soient également accessibles à la plante. Appliquée au phosphore, la valeur A mesure la quantité de phosphore assimilable en unité de l'engrais introduit.

D'après l'hypothèse de base, on a la relation :

$$\frac{mi}{A} = \frac{mr}{X}$$

mi : phosphore dans la plante provenant du phosphore assimilable du sol

A : phosphore assimilable du sol

mr : phosphore dans la plante provenant de l'engrais

X : phosphore de l'engrais ajouté

$$\text{soit : } A = \frac{X}{mr} \times mi$$

- Le phosphore du sol qui est absorbé par la plante (mi) vérifie la relation $mi = m - mr$, dans laquelle m représente la quantité totale de phosphore contenu dans la plante.

.../...

L'expression donnant A peut alors s'écrire :

$$A = \frac{X}{mr} (m - mr) = X \left(\frac{\frac{R}{X}}{\frac{r}{m}} - 1 \right) = \left(\frac{C_x}{C_p} - 1 \right) X$$

Il faut remarquer que, si les expressions mathématiques de A et L sont identiques, ces deux valeurs sont néanmoins totalement différentes. La détermination de L implique en effet un mélange homogène des deux isotopes P^{31} et P^{32} dans le sol alors que la valeur A nécessite l'absence de dilution isotopique entre le phosphore du sol et le phosphore de l'engrais. La difficulté d'application d'un tel concept consiste donc à minimiser au maximum cette dilution. C'est pourquoi Rennie et Spratt (1962), Blanchet (1965) préconisent la localisation de l'engrais sous la semence, mais, dans ce cas, les deux sources ne sont plus également accessibles. Goring (1955) utilise un mode d'expérience qui permet de s'approcher davantage des conditions idéales. En effet, il applique le principe de la valeur A à la croissance des microorganismes du sol : ainsi une période d'expérimentation réduite et une humidité restreinte du sol limitent au maximum les interactions phosphore du sol - phosphore de l'engrais malgré un mélange intime sol-engrais. D'autre part, ce protocole expérimental permet de suivre l'immobilisation biologique du phosphore.

Comme précédemment, on a la relation :

$$\frac{A}{B} = \frac{Oa}{Ob}$$

A : phosphore assimilable du sol
 B : phosphore minéral marqué ajouté
 Ob : phosphore organique synthétisé à partir du P^{32}
 Oa : phosphore organique synthétisé à partir du P du sol.

Si l'on désigne par OS la quantité totale de phosphore organique synthétisé par les microorganismes : $OS = Oa + Ob = Ob \frac{A}{B} + Ob$

En tenant compte des remarques suivantes :

../...

- L'apport au sol d'engrais phosphaté sans autre amendement ne limite pas la croissance microbienne. On peut donc considérer la synthèse de phosphore organique lors de cette croissance comme étant relativement constante quelle que soit la quantité de phosphore minéral ajouté (Goring 1955).
- Le phosphore assimilable du sol ("A") est constant pour différentes quantités de phosphate ajouté (Fried et Dean - Goring)

On aura :

$$OS = Ob \frac{A}{B} + Ob = O'b \frac{A}{B'} + O'b \quad \text{soit: } A = \frac{O'b - Ob}{\frac{Ob}{B} - \frac{O'b}{B'}}$$

Ob et O'b, étant les quantités de phosphore organique synthétisé à partir de deux doses de phosphates marqués , B et B' , peuvent être déterminées d'après les valeurs de l'activité spécifique du phosphore organique après incubation et de l'activité spécifique initiale du phosphore minéral ajouté :

$$\frac{R}{B} = \frac{r}{Ob}$$

R : radioactivité du phosphore minéral ajouté

$$Ob = \frac{r}{R} \times B$$

r : radioactivité du phosphore organique après incubation.

2-2 / METHODES ET MATERIEL

2-2-1 Modification de la méthode de Goring

Cet auteur déterminait la valeur A après un certain temps d'incubation des échantillons de sol. Or des recherches récentes (Kitazume et al. 1962) montrent qu'il se produit , dans les premières minutes suivant l'introduction de l'élément marqué, un équilibre avec le "pool précurseur interne" des microorganismes. Ainsi, Goring déterminait la synthèse de phosphore organique augmentée de ce "pool" qui se transforme rapidement en RNA stable; d'autre part, si la microflore est au repos lors de l'introduction de l'élément marqué , il y a une certaine accumulation de P^{32} dans le " pool précurseur " qui risque donc de fausser

.../...

la détermination de la synthèse due à la croissance des microorganismes.

Pour ces raisons, nous avons effectué nos dosages pour la période comprise entre le premier et le septième jour d'incubation. Nous avons d'ailleurs nous même vérifié l'existence d'un tel équilibre à la suite d'une erreur expérimentale . En effet, lors de l'étude de l'influence du fer sur la synthèse du phosphore organique nous avons ajouté une dose de FeCl_3 de dix fois supérieure à celle désirée. Nous avons obtenu alors un pH du sol de 3,5. La croissance des microorganismes étant suspendue dans ces conditions, nous avons noté une certaine incorporation de P^{32} le premier jour mais par la suite celle-ci était nulle.

2-2-2 Incubation

Des échantillons de 5 g de terre , tamisés à 2 millimètres et humidifiés à 30 % de leur capacité de rétention , sont mis à incuber à 20° pendant un et sept jours. L'engrais phosphaté est ajouté au sol sous forme de phosphate monopotassique marqué aux doses de 37,5 et 75 ppmde phosphore, la radioactivité étant de 50 μC pour 5 grammes de terre.

2-2-3 Extraction du phosphore organique

Nous avons utilisé la méthode préconisée par Mayaudon et Simonart (1964), méthode qui permet de dénaturer au minimum le phosphore organique. On effectue :

- . Une première extraction au versène 0,05 M à pH 7 pendant 15 minutes
- . Deux extractions successives à la soude 0,1 N pendant 5 minutes, extractions suivies d'une neutralisation immédiate à pH 7
- . Une dernière extraction à la soude 0,5 N à 100° pendant une heure.

... / ...

Les différents extraits sont réunis et acidifiés à pH 1 par H_2SO_4 afin de séparer les formes acido-solubles et acido-insolubles.

2-2-4 Séparation du phosphore minéral et du phosphore organique dans les deux fractions

2-2-4-1 - Fraction acido-insoluble -

Cette fraction contient, en général, peu de phosphore minéral. On effectue, néanmoins, une déminéralisation par HF 0,2 N pendant 15 minutes ; un contrôle par électrophorèse permet de vérifier l'absence de phosphore minéral.

2-2-4-2 - Fraction acido-soluble -

Cette fraction contient au contraire une très forte proportion de phosphore minéral. Nous avons été amenés à essayer différents modes de séparation :

. DIALYSE : une fraction aliquote de l'extrait acido-soluble est soumise à une dialyse contre de l'eau distillée durant 24 heures afin d'éliminer le phosphore minéral. Cette technique conduit à une dilution trop grande et par conséquent à une radioactivité très faible des prises d'essais pour le comptage. D'autre part, nous avons constaté des pertes de phosphore organique pendant la dialyse, sans doute les molécules les plus petites.

. CHROMATOGRAPHIE : on utilise du papier Whatman n° 1 et le solvant n butanol-acide acétique-eau (4 - 1 - 2,2). Les spots sont révélés par autoradiographie en mettant en contact le chromatogramme avec un film Kodirex pendant deux jours. Cependant, on obtient qu'une seule tache, celle du phosphore minéral ; le phosphore organique a une radioactivité insuffisante pour impressionner le film et il serait nécessaire de concentrer notablement l'extrait acido-soluble. Toutefois, en déterminant la radioactivité initiale de la dépose et celle de la tache du phosphore minéral après migration, on peut en déduire par différence la radioactivité du phosphore organique non révélé par la chro-

matographie. Cette méthode manque néanmoins de précision du fait que la radioactivité du phosphore organique est déduite de la différence de deux mesures et que, d'autre part, les comptages étant échelonnés dans le temps, il faut tenir compte de la décroissance de la radioactivité.

Cette technique a donné toutefois des résultats comparables à ceux obtenus par la méthode employée finalement dans notre travail (méthode de Beremblum et Chain).

- Méthode BERENBLUM et CHAIN (1938) : le phosphate présent est transformé en phosphomolybdate d'ammonium en milieu sulfurique. Ce complexe est ensuite extrait par l'alcool isobutylique. On a procédé comme suit : dans une ampoule à décanter de 25 cc, on introduit une fraction aliquote de l'extrait acido-soluble de I à 5 cc, le complémente à 10 cc d'eau, 0,8 cc de H_2SO_4 10 N, 2 cc de molybdate d'ammonium à 2,5 % et 5 cc d'alcool isobutylique. Après agitation d'une minute, on décante la phase aqueuse, contenant le phosphore organique, dans une seconde ampoule contenant 3 cc d'alcool isobutylique. On agite pendant une minute et on recueille la phase aqueuse dans une fiole de 25 cc. On effectue deux rinçages successifs des deux ampoules contenant la phase alcoolique par 2 cc de H_2SO_4 N : après agitation de 30 secondes,

.../...

on recueille les phases aqueuses des deux ampoules dans la fiole de 25cc que l'on ajuste au trait de jauge avec de l'eau.

2-2-5 Electrophorèse

La fraction acido-insoluble, redissoute dans le minimum de soude N, est soumise à une électrophorèse sur papier. Le tampon correspond à une solution de borax à 12 g/ litre et le passage du courant est maintenu pendant 3 heures sous une différence de potentiel de 7 volts/cm

2-2-6 Phosphore isotopiquement échangeable : "E"

La valeur E est déterminée après une agitation de 4 heures pendant 7 jours de 10 g de terre dans 100 cc d'eau contenant le P^{32} sans entraîneur. La radioactivité est de l'ordre de 500.000 coups par minute. On ajoute quelques gouttes de chloroforme afin de bloquer toute activité microbienne.

2-2-7 Dosage du phosphore minéral

Le dosage du phosphore minéral est fait par colorimétrie; les phosphates sont transformés en complexe phospho-molybdique réduit en bleu de molybdène sous l'action du chlorure stanneux. Les mesures sont effectuées au colorimètre pour une longueur d'onde de 660 m μ .

2-2-8 Matériel d'étude

Notre travail a porté sur six sols agricoles, dont quatre sous prairie, et sur quatre sols naturels : un sol brun acide, un sol brun légèrement lessivé, un andosol et un sol humique carbonaté.

2-2-8-1 - Sols agricoles - *

L'analyse de ces sols se trouve résumée dans les tableaux I et II.

Au point de vue texture, nous remarquons :

... / ...

- deux sols à texture franche : un limon sableux (T) et un limon (B),
- deux sols à texture plastique : un sol argileux (F_1) et un limon argileux fin (S),
- deux sols à texture battante : un limon fin (F_3) et un limon fin argileux (CS_7).

L'analyse chimique montre que :

- quatre sols ont un taux de saturation assez élevé (T - F_1 - F_3 - CS_7) et un pH légèrement acide (pH compris entre 6 et 6,3),
- deux sols ont des pH supérieurs à 7 (B : 7,2 et S : 7,4), l'un (S) contenant certainement une forte proportion de calcaire actif, ce qui expliquerait une valeur de la somme des bases échangeables très supérieure à la capacité totale d'échange.

L'aluminium échangeable est pratiquement inexistant dans ces six sols, les teneurs en sesquioxydes sont par contre assez variables. Le sol (T) contient assez peu de fer et d'alumine libre, les autres en sont pourvus en quantités notables ; le sol (F_3) est très riche en fer libre.

Ces différents sols sont généralement bien pourvus en matière organique, exception faite du sol (CS_7).

2-2-8-2 - Traitements effectués sur le sol (T) -

Le sol (T) a subi différents traitements et ceci afin d'étudier l'influence du calcium, du fer et de l'aluminium sur les quantités de phosphore assimilable :

Le fer et l'aluminium sont ajoutés respectivement sous forme de $FeCl_3$ et $AlCl_3$, de manière à apporter 2,5 mg de fer ou d'aluminium pour 5 g de sol.

* Nous tenons à remercier ici MM. Forget et Karcher de la SCPA et M. Bonnichot de la SNST qui ont bien voulu nous fournir quelques uns de ces échantillons de sol provenant de parcelles portant des essais de fumure phosphatée.

Les modifications du sol T à la suite de ces traitements sont notées dans le tableau III. Nous désignerons ces différents échantillons de sols ainsi modifiés par TCa, TFe, TAl, TFeCa et TAlCa.

2-2-8-3 - Sols naturels -

- sol brun acide
- sol brun légèrement lessivé
- Andosol
- sol humique carbonaté

Voir tableaux I et II

Ces sols ont été choisis notamment pour leurs différences de pH et de teneurs en fer et en aluminium.

.../...

- TABLEAU I -

ANALYSE PHYSIQUE

(Pourcentage de terre sèche à l'air)

	ARGILE	LIMON FIN	LIMON GROSSIER	SABLE FIN	SABLE GROSSIER	MATIERE ORGANIQUE
I	13,2	7,7	8,1	19,2	40,7	5,2
F ₁	50,0	24,5	9,3	2,4	1,8	7,8
F _{III}	19,1	40,5	23,9	7,5	6,0	7,0
B	27,0	25,0	25,0	6,3	6,0	7,6
C ₂₇	23,0	43,5	15,3	6,2	3,4	3,0
S	29	36,0	16,0	3,1	3,1	8,0
Sol brun acide	16,9	18,1	7,5	19	31	5,5
Andosol	13	34,2	18,8	14,7	20,6	7,3

Nous remercions bien vivement le laboratoire d'analyse de sol du Centre de Pédologie de Nancy pour l'aide qu'il nous a apporté dans l'analyse physique et chimique de ces sols.

.../...

- TABLEAU II -

ANALYSE CHIMIQUE

	C %	N %	C/N	pH	Fe %	Al %	Al	K +	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	T
					Libre	Libre	Echan- geable				
T	2.58	0.164	15.7	6.2	5.18	1.53	0.0007	1.39	5.0	1.8	9.5
F ₁	3.87	0.272	14.2	6.3	26.50	4.45	0.0010	0.91	26.0	3.1	28.9
F ₃	3.51	0.237	14.8	6.0	60.25	6.54	0.0007	0.51	20.5	2.0	24.4
B	3.76	0.305	12.3	7.2	12.50	3.85	0.0004	0.40	23.0	8.4	24.6
CS ₇	1.50	0.132	11.4	6.3	21.70	4.10	0.0006	0.91	12.7	1.2	15.1
S	4.07	0.307	13.3	7.4	11.7	3.03	0.0013	0.84	41.0	5.8	21.8
Sol brun lé- gèrement les- sivé.	3.32	0.15	22.	5.3	2.4	0.98	0.003				
Sol brun acide	2.77	0.173	16.	4.3	8.1	2	0.41				
Andosol	3.64	0.331	11	4.6	34.1	15.3	0.42				
Sol humique carbonaté	15.20	1.050	14.5	6.8	11.8	3.25	0.001				

- TABLEAU III -

MODIFICATIONS DU SOL T

	pH	Fe libre ‰	Al libre ‰	Al échangeable
T	6.2	5.48	1.5	0.0004
T + Ca	7	5.32	1.5	Trace
T + Fe	5.2	6.05	1.5	0.007
T + Al	4.9	5.44	1.8	0.1
T + Fe + Ca	7	5.34	1.5	Trace
T + Al + Ca	7	5.5	1.8	Trace

2-3 /RESULTATS et DISCUSSION/

2-3-1 Vérification des hypothèses formulées pour la détermination de A

2-3-1-1 - Variabilité de A pour différentes doses de phosphore ajouté au sol.

Le tableau IV indique les différents pourcentages de radioactivité immobilisée dans le phosphore organique qui est synthétisé à partir du phosphore marqué, et les valeurs A déduites de ces mesures. Nous remarquons que le phosphore assimilable est relativement constant pour des quantités d'engrais variant entre 18,75 et 112,5 ppm. Avec la dose de 150 ppm, la valeur A est supérieure et les quantités de phosphore organique synthétisé à partir du P^{32} sont identiques à celles obtenues avec 225 ppm de P. On pourrait expliquer ces deux derniers résultats par une certaine dilution isotopique entre le phosphore de l'engrais et le phosphore du sol à la suite de ces fumures très importantes.

Pour nos expériences, nous avons retenu les deux doses de 37,5 et 75 ppm de phosphore, ce qui correspond à environ 110 et 220 kg de phosphore par hectare.

- TABLEAU IV -

Xppm	Temps	r/R %			Appm
		1	2	3	
		1er Jour	7ème Jour	D = 2 - 1	
18,75		2,42	4,90	2,38	128
37,50		2,59	4,50	2,11	134
75,00		2,27	4,00	1,73	135
112,50		1,25	2,72	1,47	174
150,00		1,02	2,32	1,30	
225,00		0,72	2,02	1,30	

2-3-1-2 - Influence de ces deux doses de phosphore (37,5 et 75 ppm)
ajouté au sol sur la croissance des microorganismes

Goring admettait qu'il n'y avait pas de différence dans l'activité microbienne entre les 2 doses de phosphore qu'il ajoutait au sol. Nous avons vérifié cette hypothèse en suivant le dégagement de CO_2 lors de l'incubation des échantillons de sol. La terre est placée dans un récipient fermé hermétiquement, le CO_2 dégagé est absorbé par de la soude. On élimine le carbonate de sodium formé en le faisant passer à l'état de carbonate de baryum insoluble par adjonction de BaCl_2 dilué et on détermine la quantité de base restante.



En fait la base libre qu'on dose par HCl N/5 n'est pas la soude mais la baryte car :



Le tableau V donne les résultats enregistrés au bout de 24 h et, après renouvellement de la soude, au bout de 6 jours. Nous n'observons pas de différence significative entre les deux doses de phosphore

- TABLEAU V -

Dégagement de CO_2 pour 30 g de terre

Xppm	CO_2 mg			
	1er JOUR		6ème JOUR APRES LA 1ère MESURE.	
Sol	37,5	75	37,5	75
T	3,0	3,5	15,9	15,4
T + Ca	6,1	5,7	18,5	18,9
T + Fe	1,3	1,3	14,5	15,0
T + Al	1,7	1,3	15,0	15,4

L'erreur expérimentale est de l'ordre de 0,4 mg de CO_2 ce qui correspond à une erreur de 0,1 cc sur la chute de burette.

.../...

2-3-2 - Sol T et influence du calcium, du fer et de l'aluminium.

2-3-2-1 - Phosphore assimilable -

Les valeurs A, obtenues à partir de l'immobilisation biologique du phosphate ajouté au sol, figurent au tableau VI.

Le chaulage augmente dans tous les cas le phosphore assimilable, l'apport de fer et d'aluminium abaisse au contraire fortement la valeur A. Taylor et Gurney (1965), dosant le phosphore assimilable par l'emploi d'une résine échangeuse d'anions, notent également des quantités de phosphore extrait nettement supérieures par une augmentation de pH. Fox (1962) et Abdulbari (1964) observent, d'autre part, un effet favorable du chaulage de sols acides sur l'absorption de phosphore par les plantes. Fourcassié (1964) obtient, au contraire, un effet dépressif de l'amendement sur un limon sableux humifère fortement acide, le pH du sol après chaulage n'était cependant que de 5,8.

Nos résultats semblent montrer également que l'assimilabilité du phosphore est accrue par la présence d'aluminium échangeable. En effet, dans les échantillons T Fe et T Al, E et le phosphore en solution sont semblables alors que la valeur A est supérieure pour T Al, échantillon de sol dans lequel la quantité d'aluminium échangeable a été augmentée par l'apport de chlorure d'aluminium. Ce résultat est à rapprocher d'observations identiques faites par Ragland et Coleman (1962)

2-3-2-2 - Comparaison : P en solution - E - A -

Nous avons comparé les valeurs A obtenues au phosphore isotopiquement échangeable et aux quantités de phosphore mises en solution lors de la détermination de E.

Le phosphore en solution et le phosphore isotopiquement échangeable varient indépendamment l'un de l'autre : l'apport des trois cations diminue le phosphore en solution alors que E est augmenté par le chaulage et diminué par un enrichissement en fer et en aluminium.

- TABLEAU VI -

Valeur A pour le sol T et ses différentes
variantes.

		% $1 = \frac{r}{R} 1^{\circ} \text{ Jour}$	% $2 = \frac{r}{R} 7^{\circ} \text{ Jour}$	$3 = 2 - 1$	Appm
T	P ₁	2,39	4,5	2,11	134
	P ₂	2,27	4,00	1,73	
T Ca	P ₁	3,61	5,50	1,89	160
	P ₂	2,86	4,45	1,59	
T Fe	P ₁	0,615	5,05	4,43	30
	P ₂	1,02	3,87	2,85	
T Al	P ₁	0,672	5,54	4,87	64
	P ₂	0,592	4,15	3,558	
T Fe Ca	P ₁	2,74	5,3	2,56	110
	P ₂	2,49	4,54	2,05	
T Al Ca	P ₁	3,73	5,9	1,28	110
	P ₂	3,04	4,06	1,02	

.../...

Le rapport $\frac{A}{E}$, exprimant l'efficacité alimentaire des réserves, est maximum à pH 7 et il est indépendant du phosphore en solution (Tableau VII).

Ces résultats concordent avec ceux mentionnés par Barbier (1965) qui remarque, à la suite d'un chaulage, une libération d'ions PO_4^{---} rétrogradés et une quantité accrue de phosphore isotopiquement diluable en un temps court. Gorshkov et Bilyk (1966) aboutissent aux mêmes conclusions en étudiant l'effet d'un amendement calcaire sur des sols podzolisés grisonnés. D'autre part, Blanchet (1962) estime que les plantes ne s'alimentent pas uniquement à partir des ions PO_4^{---} en solution, mais à partir d'un essaim d'ions PO_4^{---} adsorbés.

Les résultats obtenus par Cooke (1966) corroborent également l'hypothèse selon laquelle la vitesse de reconstitution en phosphore de la solution du sol est importante pour déterminer le phosphore assimilable, la concentration de cette solution étant, par contre, moins importante.

- TABLEAU VII -

Comparaison : P en solution - E - A.

	T	T Ca	T Fe	T Al	T Fe Ca	T Al Ca
pH	6,2	7	5,2	4,9	7	7
P en solution mg	0,153	0,076	0,018	0,024	0,013	0,013
R/r	9,8	21,7	66,5	50,0	103	103
Eppm	150	165	120	120	135	135
Appm	130	160	30	64	110	110
$\frac{A}{E}$	0,87	0,97	0,25	0,53	0,82	0,82

$\frac{R}{r} = \frac{\text{Radioactivité introduite}}{\text{radioactivité restant en solution}}$

.../...

2-3-3 Comparaison des différents sols

Nous avons appliqué cette méthode de détermination du phosphore assimilable à un certain nombre de sols assez variés pour lesquels nous avons donné les principales caractéristiques. Les résultats obtenus (Tableau VIII) confirment les observations précédentes faites sur le sol (T) et permettent de formuler de nouvelles remarques qui justifient la validité de notre méthode.

- Rôle des hydroxydes de fer ou d'aluminium sur la rétention du phosphore par le sol et sur la diminution de l'efficacité alimentaire des réserves :

Les sols (F_1), (F_3), (CS_7) riches en sesquioxides libres ont un rapport $\frac{A}{E}$ très faible malgré une valeur E assez forte pour (F_3) et (CS_7) ; au contraire le sol brun lessivé pauvre en fer et en aluminium a un rapport $\frac{A}{E}$ supérieur à celui obtenu pour chacun des sols précédents et ceci malgré une faible quantité de phosphore isotopiquement échangeable.

- Rôle du PH :

Dans le sol (B) , saturé en calcium échangeable, les ions PO_4^{---} isotopiquement diluables ont une efficacité supérieure à celle des ions phosphates dans les sols (F_3) et (CS_7) malgré une réserve en phosphore moins importante dans le sol (B).

- Rôle de l'aluminium échangeable :

Le cas de l'andosol est à ce point de vue fort intéressant. En effet, notre méthode (c'est à dire sans emploi de résine pour la détermination de E) ne nous a pas permis de doser le phosphore en solution, celui-ci n'étant qu'à l'état de trace; la radioactivité de la solution était d'ailleurs également très faible. La forte teneur de ce sol en sesquioxides libres et en aluminium échangeable peut expliquer ce très fort pouvoir de rétention. Malgré cela , on note une importante quantité de phosphore assimilable. Ainsi, les ions PO_4^{---} liés à l'aluminium échangeable semblent permettre une bonne alimentation phosphorique. Le rapport $\frac{A}{E}$ du sol brun acide indique également une grande efficacité des réserves malgré un pouvoir de rétention important souligné par la faible concentration du phosphore en solution. Ici, encore, ce fait est à rapprocher de la forte teneur en aluminium échangeable de ce sol.

Les résultats obtenus pour les sols brun lessivé, T, Spo,

- TABLEAU VIII a -

Valeur A pour les différents sols.

		1 ‰ $\frac{F}{R}$ 1 ^o Jour	2 ‰ $\frac{F}{R}$ 7 ^o Jour	3 ‰ 2 - 1	Appm
T	P ₁	2.59	4.50	2.11	134
	P ₂	2.27	4.00	1.73	
F ₁	P ₁	5.79	14.61	10.82	13
	P ₂	4.18	10.40	6.22	
F ₃	P ₁	3.08	6.96	3.88	39
	P ₂	3.75	5.55	2.60	
CS ₇	P ₁	2.15	4.19	2.04	75
	P ₂	1.72	3.25	1.53	
B	P ₁	2.35	7.26	4.91	75
	P ₂	2.22	5.91	3.69	
SP ₀	P ₁	4.66	15.26	10.6	28
	P ₂	4.29	11.07	6.78	
SP ₁	P ₁	3.27	9.91	6.71	63
	P ₂	3.20	8.08	4.88	
SBL	P ₁	1.57	7.39	5.82	24.5
	P ₂	2.17	5.79	3.62	
SHC	P ₁	1.91	19.32	13.41	120
	P ₂	2.00	12.87	10.87	
Andosol	P ₁	0.77	2.52	1.75	150
	P ₂	0.49	1.95	1.46	
SBA	P ₁	3.12	7.26	4.14	70
	P ₂	2.07	5.13	3.06	

- TABLEAU VIII b -

Comparaison : P en solution - E - A.

	C %	pH	Fe ⁰ /∞	Al échange	Al ⁰ /∞	P en solution mg	R r	E ppm	A ppm	$\frac{A}{E}$
T	2.58	6.2	5.48	0.0004	1.53	0.153	9.8	150	134	0.87
F ₁	3.87	6.3	26.5	0.0010	4.45	0.006	91	55	13	0.24
F _{III}	3.51	6.0	60.25	0.0007	6.53	0.015	103	160	39	0.24
CS ₇	1.50	6.3	21.70	0.0006	4.10	0.042	47.5	200	75	0.38
B	3.75	7.2	12.50	0.0004	3.85	0.035	31	110	75	0.68
SP ₀	4.07	7.4	11.70	0.0013	3.03	0.013	75	97	28	0.29
SP ₁	4.07	7.4	11.70	0.0013	3.03	0.08	17	150	63	0.42
SbL	3.32	5.3	2.40	0.003	0.98	0.07	6.15	47	24.5	0.52
SbA	2.77	4.3	2.10	0.41	2.00	0.013	75	100	70	0.7
Andosol	3.64	4.6	34.10	0.42	15.3	-	288	-	150	-
S H C	15.2	6.8	11.80	0.001	3.25	0.003	19.45	6	120	20

SbL = Sol brun lessivé

SbA = Sol brun acide

SHC = Sol humique carbonaté.

.../...

Sp₁ et sol humique carbonaté mettent en évidence d'autres facteurs qui influent sur l'assimilabilité du phosphore.

- Facteur quantité :

Les sols brun lessivé et T ont en commun un faible pouvoir de rétention vis à vis du phosphore (peu d'argile et de sesquioxydes libres). L'efficacité alimentaire est nettement supérieure pour le sol le plus riche en phosphore isotopiquement échangeable, c'est à dire, pour le sol T.

Le rôle du facteur quantité est également démontré par les résultats obtenus sur le sol S, sol ayant reçu ou non une fumure phosphatée (Sp₁, Sp₀) : l'apport d'engrais qui a augmenté la réserve du sol a favorisé en même temps l'assimilabilité du phosphore. Il faut toutefois faire une autre remarque sur ce sol : la présence d'une forte quantité de calcaire actif semble diminuer l'efficacité des réserves.

- Rôle de la matière organique :

La minéralisation de la matière organique libère du phosphore minéral qui, de ce fait, participe à la nutrition des micro-organismes. Ceci apparaît très nettement dans le cas du sol humique carbonaté, très riche en matière organique et pauvre en phosphore isotopiquement échangeable, sol qui a une valeur A élevée.

La matière organique favorise en outre l'assimilabilité du phosphore minéral, en empêchant sans doute une adsorption trop énergique du phosphore par les sesquioxydes. Ainsi, le sol (CS₇), ayant des teneurs en fer et en alumine libre voisines de (F₁), mais un pourcentage d'argile nettement inférieur et une valeur E plus élevée, ne présente pas pour autant un rapport A/E notablement supérieur à celui de F₁. Ce fait pourrait s'expliquer par la faible teneur en matière organique du sol (CS₇)

2-3-4 Comparaison : Valeur A - réponse des végétaux aux engrais phosphatés.

Afin de vérifier ce travail de laboratoire nous avons comparé la valeur A, obtenue par l'intermédiaire des microorganismes, à une expérimentation de plein champ concernant la réponse des cultures à une fumure phosphatée.

- Fresnes en Saulnois : échantillon F₁ :

Dans ce sol très pauvre en phosphore assimilable, nous constatons un effet dépressif sur le rendement de la fumure phosphatée mais une augmentation des exportations, donc un accroissement de la concentration en phosphore lorsque la fumure azotée est faible (c'est à dire, pour un développement végétatif restreint). Les rendements et les exportations sont au contraire simultanément accrus par des fumures phosphatées croissantes, jusqu'à 200kg de P₂O₅ / ha, associées à des doses de 100 ou 150 unités d'azote par hectare de telle manière que la concentration en phosphore est maintenue ou même augmentée. Cette forte réaction du sol aux engrais phosphatés montre bien qu'il a une faible teneur en phosphore assimilable. (tableau IX)

- TABLEAU IX -

		:000	:100	:101	:102	:110	:111	:112	:120	:121	:122
Rendements Foin 14% d'humidité. Kg/ha	1° coupe	:1760	:4465	:4965	:4225	:4775	:3450	:4695	:4870	:4435	:3595
	2° coupe	:1420	:2345	:2410	:1835	:1870	:2390	:1615	:1725	:1750	:2260
	3° coupe	:970	:1080	:1100	:960	:725	:1270	:1090	:700	:910	:1235
	TOTAL	:4150	:7890	:8475	:7020	:7340	:7110	:7400	:7295	:7095	:7090
Moyenne par traitement P		:	:7795	:	:	:7283	:	:7160	:	:	:
EXPORTATIONS P ₂ O ₅ Kg/ha	1° coupe	:9.1	:25.6	:23.3	:27.0	:31.6	:24.5	:29.9	:34.5	:28.3	:23.8
	2° coupe	:7.7	:15.1	:16.0	:9.1	:10.7	:16.9	:10.7	:11.9	:10.0	:17.1
	3° coupe	:5.2	:7.3	:8.2	:4.1	:4.5	:8.9	:8.0	:5.2	:5.7	:9.6
	TOTAL	:22.0	:48.0	:47.5	:40.2	:46.8	:50.3	:48.6	:51.6	:44.0	:50.5
Moyenne par traitement P		:	:45.26	:	:	:48.56	:	:48.57	:	:	:

		/ TRAITEMENTS /								
		200	201	202	210	211	212	220	221	222
<u>Rendements Foin I4 % humidité kg/ha</u>										
1 ^o Coupe		3285	3630	4070	3510	4200	5080	4425	4970	4340
2 ^o Coupe		2945	2750	3445	3130	2215	3565	2200	3045	3275
3 ^o Coupe		1035	1240	1065	1265	1025	1325	1095	1510	1100
TOTAL		7265	7620	8580	7905	7440	9970	7720	9525	8715
Moyenne par traitement P		7821			8458			8653		
<u>Exportations P₂O₅ kg/ha</u>										
1 ^o Coupe		17.4	25.3	22.4	24.0	27.0	31.3	28.3	31.8	27.9
2 ^o Coupe		17.8	19.0	21.1	22.2	14.1	22.9	16.7	20.1	20.1
3 ^o Coupe		5.2	3.0	6.8	8.4	6.6	9.3	8.0	10.7	6.8
TOTAL		37.4	50.3	50.4	54.6	47.7	63.5	53.0	62.6	54.8
Moyenne par traitement P		46.03			55.26			56.8		

		300	301	302	310	311	312	320	321	322
<u>Rendements foin I4 % humidité kg/ha</u>										
1 ^o Coupe		6065	6160	4390	5830	6110	5370	5195	6060	6740
2 ^o Coupe		3150	2710	3130	2855	3470	2190	3350	2720	3740
3 ^o Coupe		1580	1720	1690	1745	1905	1930	1980	1760	2255
TOTAL		10795	10590	9210	10430	11485	9490	10525	10540	12735
Moyenne par traitement P		10198			10468			11266		
<u>Exportations P₂O₅ kg/ha</u>										
1 ^o Coupe		36.1	31.1	21.0	33.4	39.1	33.2	33.2	38.9	43.2
2 ^o Coupe		19.1	9.8	17.8	16.3	21.5	10.9	19.9	17.4	21.5
3 ^o Coupe		11.9	9.1	9.6	12.3	13.5	11.4	12.5	13.7	16.0
TOTAL		67.4	50.0	48.4	64.0	74.1	55.5	65.6	70.0	80.7
Moyenne par traitement P		56.8			64.53			72.1		

N { 1 = 50 kg/ha
2 = 2 x 50 kg/ha
3 = 3 x 50 kg/ha

P { 0 = 0
1 = 100 kg/ha
2 = 200 kg/ha

K { 0 = 0
1 = 100 kg/ha
2 = 200 kg/ha

.../...

	/ TRAITEMENTS /									
	000	100	101	102	110	111	112	120	121	122
Teneur moyenne en P ²⁰⁵ en % (rapportée à la matière à I4 % d'eau).	0.53	0.58				0.66			0.68	

	200	201	202	210	211	212	220	221	222
Teneur moyenne en P^{205} en % (rapportée à la matière à I4 % d'eau)	0.59			0.65			0.66		

	300	301	302	310	311	312	320	321	322
Teneur moyenne en P^{205} en % (rapportée à la matière à I4 % d'eau)	0.55			0.61			0.64		

- Chateau Salins : échantillon CS7 :

Notre détermination du phosphore assimilable porte sur un échantillon de sol du bloc 7. Malgré un très fort coefficient de variation de cet essai, on peut toutefois noter qu'il semble se produire une fixation de l'acide phosphorique à la suite des fumures pratiquées. Ceci s'expliquerait, comme nous l'avons vu dans l'étude de ce sol, par la présence d'une forte teneur en sesquioxydes libres associée à une faible teneur en matière organique. Le rapport $\frac{A}{E}$ peu élevé dans ce sol, malgré une réserve importante en phosphore isotopiquement diluable, montre bien la faible mobilité du phosphore. Un apport de phosphore augmentant la concentration de la solution du sol favoriserait une certaine rétrogradation.

.../...

- TABLEAU X -

Traitements	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃
Bloc				
I	40.74	36.02	35.90	39.13
II	40.49	38.84	34.84	40.00
III	39.6	31.67	34.78	38.81
IV	36.64	31.42	37.70	32.98
V	37.88	34.16	37.88	36.58
VI	41.05	42.17	36.89	42.04
VII	40.99	38.44	39.50	32.79

TRAITEMENTS	RENDREMENTS
P ₀	39.55 qx
P ₁	35.53 qx
P ₂	36.79 qx
P ₃	37.37 px
Coefficient de variation : 14,8	
Différence significative :	
P = 5 %	2,62 qx

P₀ = 0 unité

P₁ = 60

P₂ = 120

P₃ = 180

.../...

C O N C L U S I O N

La détermination du phosphore assimilable par l'application du concept A de Fried et Dean aux microorganismes du sol permet de mettre en évidence les mêmes observations que des études chimiques ou faites à partir de cultures de plantes. Ce sont notamment le rôle des facteurs quantité et mobilité du phosphore, l'effet de la matière organique, du pH, du calcaire actif et des sesquioxydes libres.

Du point de vue pratique, notre méthode offre l'avantage de réduire considérablement la durée d'expérimentation et donne certainement une valeur A plus exacte en diminuant les échanges isotopiques, et ceci malgré un mélange intime de l'engrais au sol.

La comparaison de cette valeur A à de premiers résultats d'expérimentation en plein champ semblerait bien confirmer la validité de notre méthode. On doit cependant remarquer que l'emploi de la microflore donne un reflet de l'ensemble du sol et élimine l'influence de la répartition du système racinaire. Ainsi, le phosphore minéral du sol assimilable par les microorganismes représenterait une valeur surestimée du phosphore assimilable par des végétaux cultivés en plein champ ou plutôt le potentiel alimentaire du sol dans des conditions de croissance optimum permettant une bonne exploitation du sol par les racines.

3 - IMMOBILISATION BIOLOGIQUE

3 - IMMOBILISATION BIOLOGIQUE -

3-1 / RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES /

3-1-1 - Dosage du phosphore organique:

Harrap (1963) classe en deux groupes les méthodes de dosages du phosphore organique : ignition et extraction.

3-1-1-1 Ignition:

On transforme le phosphore organique en phosphore minéral par ignition du sol, puis on soumet celui-ci à une extraction à l'acide sulfurique. Le phosphore minéral est dosé dans les extraits de sols calcinés et non calcinés ; on évalue le phosphore organique par différence entre les deux valeurs obtenues (Legg et Black 1955).

Cette méthode présente deux inconvénients :

- la solubilité du phosphore minéral du sol peut être altérée par l'ignition,
- la transformation du phosphore organique doit avoir lieu uniquement lors de la calcination. Or Anderson (1960) a montré qu'il se produit une hydrolyse des esters phosphoriques durant l'extraction à l'acide sulfurique.

3-1-1-2 Extraction:

Le phosphore organique et une grande partie du phosphore minéral sont extraits du sol par divers réactifs.

Après minéralisation, on détermine la quantité de phosphore organique par l'accroissement en phosphore minéral de l'extrait original.

Dans cette méthode, le sol doit être en premier lieu traité de manière à enlever la majeure partie des cations tels que le calcium, l'aluminium, le magnésium et le fer qui retiennent les composés phosphorés dans le sol (Jackman et Black 1951). Ce pré-traitement peut faire intervenir l'action d'un acide minéral concentré (Mehta et al. 1954) ou celle d'un agent chélatant tel que le 8-hydroxyquinoline

(Boswall et Delong 1959) ou l'EDTA (Harrap 1963, Mayaudon et Simonart 1964). L'action d'un acide minéral chaud peut provoquer l'hydrolyse des esters phosphoriques (Anderson 1960), au contraire l'EDTA permet de soustraire les cations du sol en évitant l'hydrolyse (Harrap 1963).

La détermination du phosphore organique dans ces deux méthodes s'effectue par différence, ce qui donne une précision médiocre dans le cas d'une faible teneur en phosphore organique.

Pour éviter ces erreurs, Goring (1955), Anderson et Black (1965) séparent le phosphore organique du phosphore minéral des extraits par absorption du phosphore organique sur du Carbone Norit A et dosent celui-ci après calcination du carbone et reprise du résidu par de l'acide chlorydrique.

Notre travail nécessitait, toutefois, une séparation et un dosage du phosphore organique sans le transformer. Nous avons mentionné la procédure suivie au chapitre précédent.

3-1-2 - Nature du phosphore organique et sa liaison avec le reste de la matière organique :

Cosgrove (1963), Wild et Oke (1966), Martin et Wicken (1966) montrent la présence d'inositol phosphate, notamment l'hexaphosphate myoinositol, le DL inositol, le scylloinositol pentaphosphate et le myoinositol monophosphate. Bower (1945), Anderson (1961) notent de fortes teneurs en inositol hexaphosphate, de 30 à 50 % du phosphore organique total, Caldwell et Black (1958), Grindel et Zyrin (1965) n'en trouvent au maximum que 18 à 30 %. Les phospholipides (Hance et Anderson 1963), les phosphatides (Grindel et Zyrin) ne représentent qu'une très faible proportion du phosphore organique. Les taux d'acides nucléiques sont très variables suivant les auteurs (jusqu'à 60 % du phosphore organique total pour Solokolov 1948, Bower 1949). Cependant, l'emploi récent de méthodes spécifiques pour identifier ces composés n'a permis d'en détecter que de faibles quantités.

... / ...

Ainsi, une grande partie du phosphore organique du sol a encore un caractère inconnu et semble lié aux acides humiques et fulviques. Dormaar (1963) montre l'intérêt de l'électrophorèse pour localiser le phosphore dans les acides humiques.

3-1-3 - Relation entre les teneurs en phosphore organique des sols et certaines de leurs caractéristiques.

Différentes propriétés du sol, telles que le phosphore total, le carbone, l'azote, l'aluminium, le fer, le pH et la texture ont été l'objet d'analyse de corrélation avec le phosphore organique par de nombreux auteurs. Cependant, les résultats sont souvent en contradiction (Barrow, 1961). Les relations du phosphore organique avec ces facteurs semblent variables suivant les types de sols. John (1965) étudiant de nombreux sols appartenant à différents ordres, constate une relation significative entre le phosphore organique et le pH, le phosphore total, le fer libre, pour certains groupes de sols mais pas dans les autres. Au contraire, le carbone et l'azote se montrent liés de façon significative avec le phosphore organique dans tous les sols. Dans une étude de corrélations multiples pour l'ensemble des sols, seuls l'azote et le pH interviennent. Le fait que le carbone n'ait pas un effet direct sur les teneurs en phosphore organique, bien que leur étant lié, peut s'expliquer par la corrélation carbone-azote, le carbone n'étant pas dans ces sols un facteur limitant.

Black et Goring (1953) étudiant le rapport entre le carbone et le phosphore organique trouvent que celui-ci est voisin de 110 pour les sols minéraux, mais qu'il est beaucoup plus élevé dans les sols tourbeux. Kaila (1948) note un rapport de 700 à 800 pour 30 sols tourbeux. Pratt (1963) montre également que dans deux groupes de sol, l'un alluvial, l'autre marécageux, le rapport C/P est supérieur pour les sols marécageux mais qu'il n'y a aucune corrélation de C/P avec le carbone à l'intérieur de chaque groupe. Ce rapport C/P supérieur pour les sols marécageux serait dû à une végétation moins riche en phosphore.

D'autre part, le phosphore organique de ces sols marécageux dériverait principalement des résidus des plantes tandis que dans les sols alluviaux il résulterait surtout de synthèses microbiennes.

Ces résultats montrent la complexité qu'il existe à lier les quantités de phosphore organique des sols à certaines de leurs caractéristiques. Cette difficulté est due essentiellement au fait que ces études dressent un bilan entre les gains en phosphore organique et la minéralisation de celui-ci, avec pour les gains deux origines :

- d'une part les débris végétaux, ceux-ci pouvant être plus ou moins riches en phosphore,
- d'autre part la réorganisation du phosphore minéral en phosphore organique.

C'est pourquoi nous nous sommes limités à une étude plus restreinte concernant uniquement l'immobilisation par les microorganismes.

3-2 / I MOBILISATION PAR LES MICROORGANISMES DU PHOSPHORE MINÉRAL DU SOL

La transformation en phosphore organique du phosphore minéral du sol ou des engrais peut jouer un rôle important dans la nutrition des végétaux en immobilisant une partie du phosphore assimilable. Ainsi, dans certains sols de prairies permanentes, Jackman (1954) évalue cette transformation entre 20 et 30% du phosphore appliqué. Goring (1955) étudiant l'immobilisation du phosphore par les microorganismes du sol, constate qu'au bout d'un temps variable (entre 7 et 10 jours) la synthèse de phosphore organique diminue fortement. Mayaudon et Simonart (1964) montrent que ce phénomène est dû essentiellement à la minéralisation du phosphore organique formé et non pas à une baisse du pouvoir de synthèse des microorganismes. Dans ses expériences, Goring note qu'une grande partie du phosphore organique est synthétisé le premier jour. Nous avons précédemment mentionné que ce phénomène résulterait d'un équilibre entre le P^{32} ajouté et le phosphore des microorganismes durant les premières minutes d'incubation,

... / ...

et ceci nous avait amené à modifier le protocole de Goring afin de ne pas tenir compte de cette transformation initiale.

La méthode employée pour séparer le phosphore organique du phosphore minéral dans la solution d'extraction nous a permis d'étudier l'influence du calcium, du fer et de l'aluminium sur la synthèse du phosphore organique par les microorganismes, tant du point de vue quantitatif que qualitatif.

3-2-1 - Etude quantitative -

Nous avons vu (chapitre 2) que la synthèse totale du phosphore organique se déduit de la relation :

$$OS = Ob + \frac{A}{B} \times Ob$$

OS : synthèse totale du phosphore organique entre le 1er et 7ème jour d'incubation.

Ob : synthèse du phosphore organique à partir du P^{32} durant la même période

A : phosphore assimilable du sol

B : phosphore ajouté.

3-2-1-1 - Sol T et ses différentes modifications -

Les résultats obtenus figurent au tableau XI.

- L'effet du chaulage de T et TFe est opposé à celui de TAl. Dans les deux premiers cas, le calcium favorise la synthèse de phosphore organique alors qu'au contraire le traitement TAlCa diminue cette synthèse.

- Les apports de fer ou d'aluminium sous forme de chlorures influent, eux aussi, de façon différente sur la synthèse: le fer la réduit, l'aluminium l'augmente.

La comparaison de ces observations aux modifications de certaines caractéristiques du sol T, modifications dues aux divers

- TABLEAU XI -

Influence du calcium, du fer et de l'aluminium
sur la synthèse du phosphore organique dans le sol T

Sol	Appm	Obppm	OS ppm	$\frac{OS}{C}$	$\frac{R_7}{R_1}$
T	130	1.30	3.55	1.37	0.67
T Ca	160	1.19	3.75	1.45	0.74
T Fe	30	2.15	2.98	1.15	0.74
T Al	64	2.65	4.9	1.9	0.57
T Fe Ca	110	1.53	3.78	1.46	0.74
T Al Ca	110	0.76	1.89	0.73	0.78

Ob : phosphore organiquesynthétisé à partir du P^{32} pour la dose d'engrais 75 ppm.

R_1 : phosphore organique acido-soluble/phosphore organique acido-insoluble le 1er Jour.

R_7 : phosphore organique acido-soluble/phosphore organique acido-insoluble le 7èmejour.

.../...

traitements effectués sur ce sol, montre que :

- Le rôle dépressif du chlorure ferrique résulterait de la baisse de pH du sol puisque le chaulage, ne diminuant que très peu les teneurs en fer libre, amène de nouveau le taux de synthèse à son niveau maximum.
- Dans T Al, la présence d'aluminium échangeable, due à l'apport de chlorure d'aluminium, semble permettre une synthèse importante et ceci malgré un pH plus acide que celui de TFe.
- Au contraire, la formation d'alumine libre dans le traitement T Al Ca inhibe très fortement l'immobilisation biologique du phosphore.

3-2-1-2 - Ensemble des sols -

L'influence du calcium, du fer ou de l'aluminium, observée sur un sol dont on a modifié artificiellement les caractéristiques, a pu également être montrée sur différents sols naturels. Nous avons étudié l'action de ces trois cations sur le rapport $\frac{OS}{C}$ ce qui, éliminant le facteur limitant que pourrait introduire le taux de carbone, permet de comparer les sols entre eux.

Les résultats du tableau XII confirment nos premières remarques. En effet:

- Les sols dont le complexe argilo-humique est bien pourvu en calcium ont un rapport OS/C élevé, exception faite du sol F₃ (il semble que la très forte teneur de ce sol en fer libre soit la cause de cette faible synthèse) . Au contraire le sol brun légèrement lessivé, à pH acide, a un faible rapport OS/C .
- L'effet favorable de l'aluminium échangeable est montré par le sol brun acide qui, malgré un complexe adsorbant désaturé (pH 4,3) présente un taux de synthèse plus important que celui des sols à pH compris entre 6 et 7 .
- Le cas de l'andosol semble plus complexe, mais en tenant compte de nos remarques sur les sols TAlCa et F₃, on peut penser que l'effet

positif de l'aluminium échangeable est ici très fortement inhibé par les hautes teneurs en sesquioxydes libres de ce sol.

- TABLEAU XIII -

Synthèse du phosphore organique dans les
différents sols.

Sols	Appm	Ob ppm	OS ppm	$\frac{OS}{C}$	$\frac{R_7}{R_1}$
T	130	1.3	3.55	1.37	0.67
F ₁	13	4.65	5.45	1.40	1.26
F ₃	35	1.95	2.95	0.84	0.60
B	75	2.76	5.52	1.47	0.63
CS ₇	75	1.15	1.3	1.53	1
SP ₀	28	5.08	6.98	1.71	0.81
SP ₁	63	3.66	6.75	1.65	0.83
Sol brun légèrement lessivé	24.5	2.72	3.61	1.12	0.6
Sol brun acide	70	2.30	4.44	1.6	0.66
Andosol	150	1.10	3.2	0.88	0.87
Sol humique carbonaté	120	8.15	21.15	1.4	1.45

- L'étude des sols SP₀ et SP₁ apporte en outre la confirmation de l'hypothèse selon laquelle la synthèse du phosphore organique est indépendante de la teneur en phosphore assimilable du sol. En effet, cette expérience portant sur deux échantillons d'un même sol ayant reçu ou non une fumure phosphatée montre bien que, malgré des teneurs différentes en phosphore assimilable, la synthèse du phosphore organique par les microorganismes demeure relativement constante.

.../...

3-2-2 - Etude qualitative -

Le phosphore organique extrait a été fractionné en composés acido-solubles et acido-insolubles, puis ces derniers en composés mobiles ou immobiles par électrophorèse. L'autoradiographie et la détermination de la radioactivité le long des électrophorégrammes se sont utilement complétées (planche 1).

L'emploi de l'électrophorèse continue essayée lors de notre travail a donné des résultats ~~parallèles~~ à ceux obtenus par la méthode classique.

3-2-2-1 - Répartition du phosphore organique synthétisé en composés acido-solubles et acido-insolubles :

On a étudié ici l'évolution du rapport phosphore organique acido - soluble sur phosphore organique acido - insoluble, en prenant pour origine la valeur de ce rapport après un jour d'incubation (R_1) et en déterminant sa nouvelle valeur six jours plus tard soit (R_7).

3-2-2-1-1 - Sol T et ses différentes modifications -

Les résultats obtenus, tableau XI, semblent montrer une évolution assez semblable pour tous les échantillons : une formation plus importante de composés acido-insolubles que de composés acido-solubles. Toutefois, on peut noter que :

- L'apport de chaux aux sols T, TFe, Tal, ou l'acidité de TFe due au chlorure ferrique donne un rapport R_7/R_1 supérieur à celui du sol T, c'est à dire favorise une synthèse plus importante de composés acido-solubles. L'action du chaulage et celle de l'acidité sont toutefois différentes et, comme nous le verrons dans l'étude de la fraction acido-insoluble, ces traitements s'opposent de façon très nette.

3-2-2-1-2 - Ensemble des sols (tableau XII)-

- dans les sols à pH compris entre 6 et 7, bien pourvus en calcium échan-

geable, de fortes teneurs en alumine libre (F_1 , CS_7 , sol humique carbonaté) sont liées à un rapport R_7/R_1 élevé, c'est à dire à une synthèse importante de composés acido-solubles, de fortes quantités de fer (F_3) pouvant malgré tout favoriser la formation de composés acido-insolubles.

- Dans les sols à pH plus acide, c'est également l'alumine libre et non l'aluminium échangeable qui semble être liée à un rapport R_7/R_1 élevé. En effet, les sols brun légèrement lessivé et brun acide, ayant des teneurs très différentes en aluminium échangeable mais peu d'alumine libre, ont un rapport R_7/R_1 assez faible ; à l'opposé, l'andosol riche en aluminium échangeable mais également en alumine libre présente un rapport R_7/R_1 plus élevé.

3-2-2-2 - Mobilité électrophorétique des composés acido-insolubles -

Cette étude a porté uniquement sur les extraits sodiques. En effet, l'EDTA précipite lors de l'acidification à pH 1 et cela pourrait gêner l'électrophorèse ; le phosphore extrait à l'EDTA a toujours été d'ailleurs assez faible. On détermine la radioactivité le long des électrophorégrammes de manière à établir le rapport :

phosphore organique mobile après un jour ($R'1$) et 7 jours ($R'7$)
phosphore organique immobile

d'incubation. Le graphique 1 rend compte de nos observations pour quelques sols caractéristiques.

- Les sols bien pourvus en calcium échangeable, à pH supérieur à 6, présentent tous une forte proportion de composés acido-insolubles immobiles quelle que soit la teneur en alumine libre de ces sols. Des taux importants de fer libre pourraient accentuer cette évolution.
- Dans les sols à pH acide, la formation de composés mobiles est prépondérante. Toutefois l'aluminium échangeable en l'absence de quantités importantes d'alumine libre entraîne une augmentation de la proportion des composés immobiles.

CONCLUSION :

La synthèse de phosphore organique par les microorganismes semble être liée de façon étroite aux teneurs en calcium, fer et aluminium.

a) Du point de vue quantitatif :

- un pH acide ou de fortes teneurs en sesquioxydes libres diminuent la synthèse du phosphore organique, au contraire celle-ci augmente avec le pH . Goring (1955) trouve également un pH optimum compris entre 6 et 7. Zářkova et Maslova (1965) remarquent que le phosphore organique représente 37 % du phosphore total dans les horizons supérieurs de chernozem et 14 à 31 % dans les sols gris de forêt, ces derniers contenant une plus grande proportion de phosphates de sesquioxydes que les chernozem.

- à pH acide, l'aluminium échangeable en l'absence de grande quantité d'alumine libre favorise une synthèse aussi importante que dans les sols riches en ions Ca^{++} .

b) Du point de vue qualitatif :

Si on admet que la différenciation en composés acido-solubles, acido-insolubles mobiles par électrophorèse, acido-insolubles immobiles par électrophorèse est liée à une polymérisation croissante, on constate que :

- à pH supérieur à 7, ce sont dans les sols saturés en ions Ca^{++} échangeables, sans excès de calcaire actif, que la synthèse du phosphore organique produit les composés les plus polymérisés.

- dans les sols à pH compris entre 6 et 7, bien pourvus en ions Ca^{++} , l'alumine libre semble liée à l'augmentation de la proportion des composés les moins polymérisés (composés acido-solubles), les composés acido-insolubles présentant encore une forte polymérisation. Des teneurs élevées en fer libre augmenteraient au contraire la polymérisation.

- dans les sols désaturés, en l'absence d'excès d'alumine libre ou d'aluminium échangeable, la diminution de la polymérisation porte essentiellement sur les composés acido-insolubles. La présence d'alumine libre, quelles que soient les teneurs du sol en aluminium échangeable, est liée à une augmentation des composés acido-solubles ;

au contraire, l'aluminium échangeable dans des sols pauvres en alumine libre augmente la polymérisation.

Ces résultats peuvent se rapprocher de constations faites par différents auteurs. Nehring et Wiesemüller (1966) notent une augmentation des acides fulviques dans les sols en voie d'acidification (résultat que, pour notre part, nous ne trouvons que dans le cas d'une augmentation simultanée de l'alumine libre) et une augmentation des acides humiques, notamment des acides humiques gris par un chaulage de ces sols. Duthion et Chrétien (1966) montrent l'intérêt de la détermination de l'aluminium complexé et, mais dans une moindre mesure, de l'aluminium échangeable comme critère de l'altération. Ainsi, nos résultats constatant une certaine concordance entre la présence de fortes teneurs en alumine libre et l'augmentation de la synthèse de composés acido-solubles apportent des preuves supplémentaires à l'hypothèse émise par Duchaufour (1964), Juste (1965), selon laquelle c'est la fraction fulvique qui est la plus réactive vis à vis des composés métalliques.

D'autre part, nous pensons qu'il faut insister sur le rôle de l'aluminium échangeable qui favorise la polymérisation des composés organiques formés lors de l'humification.

- PLANCHE I -

AUTORADIOGRAPHIE DES ELECTROPHOREGRAMMES
DES COMPOSES ACIDO-INSOLUBLES DE T-T Ca-
TFe- TAl

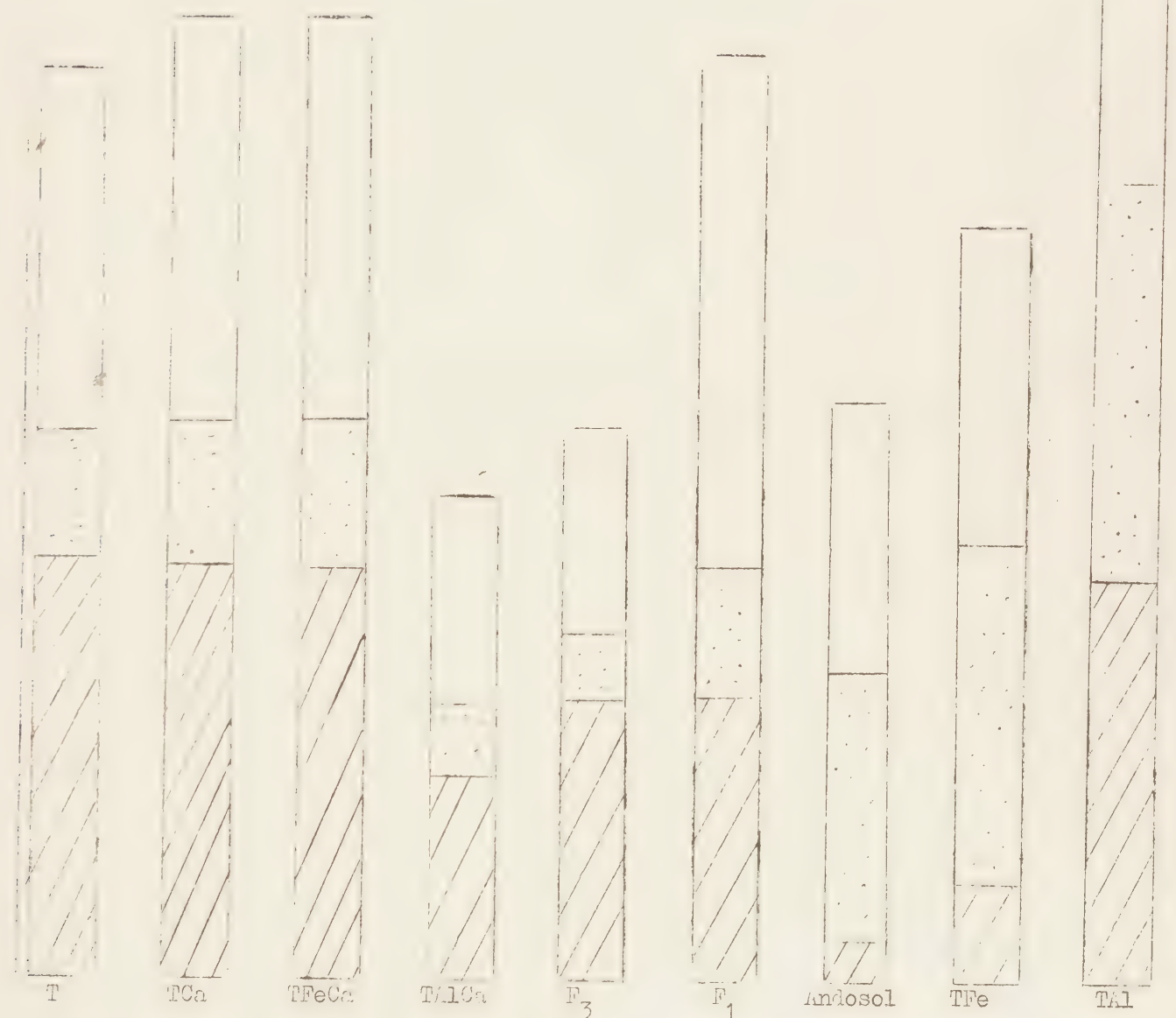
• Après 1 Jour d'incubation •

• Après 7 Jours d'incubation •

- GRAPHIQUE 1 -

FRACTIONNEMENT DU PHOSPHORE ORGANIQUE

*. Sols bien pourvus en Ca^{++} * *. Sols désaturés. . . . *



 phosphore organique acido-soluble
 phosphore organique acido-insoluble mobile par électrophorèse
 phosphore organique acido-insoluble immobile par électrophorèse

4 - METABOLISME DU PHOSPHORE DANS
DES PLANTULES D'ORGE.

4 - ETUDE DE L'INFLUENCE DU CALCIUM, DU FER ET DE L'ALUMINIUM SUR LE METABOLISME DU PHOSPHORE AU COURS DU DEVELOPPEMENT DE PLANTULES D'ORGE.

4-1 /RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES /

L'influence des trois cations, calcium, fer et aluminium sur la nature des composés phosphorés dans les végétaux a été assez peu étudiée ; la plupart des travaux concernent essentiellement l'influence de l'aluminium sur l'absorption du phosphore et son transport dans la plante. Les résultats sur ce point sont assez souvent contradictoires et semblent dépendre :

a) de la nature des plantes utilisées ; les unes ont la possibilité d'accumuler une certaine quantité d'aluminium sans présenter de phénomène de toxicité, tels certains pins (Humphreys 1964, Juste 1965), d'autres au contraire sont très sensibles : citons l'orge, la betterave (Juste 1965).

b) de la concentration en aluminium des solutions : Randall et Vose (1963) sur ray-grass, Juste (1965) sur pin maritime obtiennent des résultats opposés suivant les teneurs en aluminium des solutions nutritives. A faible concentration, ces auteurs obtiennent une stimulation de la croissance alors qu'à forte concentration, un effet dépressif très net apparaît.

Généralement, la toxicité de l'aluminium s'extériorise par un moindre développement des parties aériennes, avec souvent des symptômes de carences en phosphore et une atrophie du système racinaire (Ahmad 1960, Juste 1965); Clarkson (1965) montre l'inhibition de l'aluminium sur la division cellulaire dans les racines. Certains auteurs pensent que cette toxicité correspond à des troubles dans la nutrition minérale :

- carence en phosphore (Foy-Brown, 1964)
- effet dépressif sur l'absorption et le transport du calcium (Johnson et Jackson, 1964).

.../...

-antagonismes : Cu^{++} - Al^{+++} (Liebig, Vanselow et
Chapman, 1962)

Mg^{++} - Al^{+++} (Dios, Vidal et Broyer, 1964)

Dépendant la toxicité de l'aluminium ne semblerait pas pouvoir s'expliquer uniquement par un trouble dans la nutrition minérale car, si Juste (1965) trouvait une concentration en phosphore, potassium et magnésium augmentée après des apports d'aluminium au milieu nutritif de base, il faut toutefois noter que dans ces expériences le développement des plantes était très réduit et il paraît difficile d'affirmer la présence d'une stimulation de l'absorption du phosphore par l'aluminium.

Des recherches récentes s'orientent vers l'étude de l'influence de l'aluminium sur l'incorporation du phosphore dans les molécules organiques (Rorison, 1964 ; Clarkson, 1965) ; d'autre part, l'accumulation de phosphore dans les racines correspondrait en grande partie à du phosphore minéral lié à l'aluminium dans le "Donnan Free Space", c'est à dire à la surface des membranes cellulaires. Seule une faible quantité d'aluminium pénètre à l'intérieur des cellules, peut-être dans les mitochondries, et affecte la phosphorylation des hexoses. La diminution de transport du phosphore vers les feuilles serait liée au faible développement racinaire ; en effet, Clarkson remarque que la quantité de phosphore transporté par unité de poids des racines est la même en présence ou en l'absence d'aluminium.

Le fer provoquerait également un accroissement de la teneur en phosphore des racines et une diminution de celle-ci dans les parties aériennes. L'hypothèse de la formation d'un complexe organique qui engloberait le fer et le phosphore a été formulée (Carpentier, 1955). D'autre part, Parkash et Subbiah (1965) notent une accumulation de phosphore dans les nervures.

Le chaulage permettrait bien souvent de corriger la toxicité due à l'aluminium en précipitant l'aluminium soluble (Juste 1965)

.../...

4-2 TECHNIQUES

L'influence des trois cations a été étudiée sur des plants d'orge cultivés en solution nutritive de Hoagland (Tableau XIII) avec apport de calcium, de fer et d'aluminium, et ceci respectivement sous forme de CaO , FeCl_3 et Al Cl_3 . La solution enrichie en calcium contient 30 me/l de cet élément soit trois fois plus que le témoin, celles enrichies en fer et en aluminium 30 mg/l soit également trois fois plus que la solution témoin dans le cas du fer. Toutes les solutions sont ajustées à pH 6 par NaOH ou HCl.

- TABLEAU XIII -

Composition de la solution
nutritive de Hoagland.

a) éléments majeurs

SELS	MILLIEQUIVALENTS PAR LITRE					
	Ca^{++}	Mg^{++}	K^+	SO_4^{--}	H_2PO_4^-	NO_3^-
$\text{Ca} (\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	10					10
K NO_3			5			5
$\text{KH}_2 \text{PO}_4$			1		1	
$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$		2		2		

b) le Fer : est apporté à raison de 10 mg/l de solution sous forme de $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$.

c) les oligo-éléments : sont apportés selon la formule A_4 d'Arnon :

B : 0,5 ppm
Mn : 0,5 ppm
Zn : 0,05 ppm
Cu : 0,02 ppm

.../...

4-2-1 - Technique de culture.

Les graines sont mises à germer pendant une semaine sur une couche de sable humidifié avec de l'eau distillée. Après cette période, les plantes sont soumises aux différents traitements suivant le dispositif ci-dessous (Schéma 1).

élastique
maintenant
le nylon



sable
tulle de nylon
agitateur
papier noir

Le niveau de la solution est ajusté tous les jours avec de l'eau distillée pendant la période qui a été fixée à trois semaines. Les solutions nutritives modifiées, présentant des précipités, sont agitées périodiquement afin de mettre ces précipités en contact avec les racines.

4-2-2 - Préparation du phosphate monopotassique marqué.

A la quantité requise de KH_2PO_4 , on ajoute du P^{32} sans entraîner ($\text{H}_3\text{P}^{32}\text{O}_4$) de manière à avoir une radioactivité de 0,1 mc par gramme de P_2O_5 .

4-2-3 - Détermination quantitative du phosphore.

4-2-3-1 - Phosphore total -

Après minéralisation nitroperchlorique du végétal, on dose le phosphore total par colorimétrie, ce qui nécessite d'ajuster au préalable la valeur du pH de la solution entre 3 et 4.

4-2-3-2 - Séparation Phosphore minéral - Phosphore organique acido-soluble.

Les végétaux sont broyés à froid dans un mortier avec du sable de Fontainebleau et quelques ml d'acide perchlorique N pendant

.../...

20 minutes. Après séparation du surnageant par centrifugation, on rince deux fois avec de l'eau distillée.

- Dosage du phosphore minéral et organique dans le surnageant : après précipitation de l'excès d'acide perchlorique par de la potasse à 20 %, on sépare le phosphore organique par transformation du phosphore minéral en phosphomolybdate d'ammonium qui est extractible par l'alcool isobutylique en milieu acide. Par décantation on sépare la phase aqueuse, contenant le phosphore organique, de la phase alcoolique, contenant le phosphore minéral. Connaissant la radioactivité spécifique du phosphore dans la solution nutritive, on en déduit, par simple détermination de la radioactivité des différentes fractions, les quantités de phosphore présent : en effet : $\frac{R}{M} = \frac{r}{m}$

$$\text{soit : } m = \frac{r}{R} \times M$$

m : Phosphore dans la fraction étudiée

M : Phosphore dans la solution nutritive

R : Radioactivité totale introduite

r : Radioactivité de la fraction étudiée

- Dosage du phosphore dans le culot de centrifugation (acido-insoluble) : le culot est mis en suspension dans de l'eau et on effectue un comptage sur une fraction aliquote. La quantité de phosphore présent se déduit également de la relation $\frac{R}{M} = \frac{r}{m}$

4-2-4 - Techniques autoradiographiques.

Cette partie de l'étude a été effectuée dans les services spécialisés du Département de Radioagronomie de Cadarache (Laboratoire de Monsieur Khau Van Kiem).

4-2-4-1 - Macro-autoradiographie -

Les végétaux entiers sont tués immédiatement après expérimentation. Deux méthodes de fixation peuvent être employées :

- Les plantes enroulées dans du papier Joseph imbibé de formol sont enveloppées de plastique ou de papier d'aluminium et portées à l'é-

.../...

tuve à 70° pendant 1 à 2 heures. Une simple fixation par la chaleur donnerait des plantes cassantes, ici les végétaux conservent leur souplesse.

- Fixation par le froid (azote liquide). Ici, également, le végétal revenant doucement à la température ambiante demeure souple.

Les plantes ainsi fixées sont mises à sécher pendant une nuit entre des feuilles de papier filtre pour enlever le formol ou l'humidité. L'autoradiographie s'effectue en mettant en contact les plantes, montées sur un carton bristol, avec un film Kodirex durant une nuit.

- 4-2-4-2- Micro-historadiographie -

Préparation des coupes :

Deux techniques de coupes microscopiques ont été utilisées.

a) Cryotome : des fragments de végétaux sont inclus entre deux morceaux de foie de souris et congelés - 30°. Les coupes faites à - 17° sont alors disposées sur des lames gélatinées Ilford.

b) Inclusion dans la cire soluble : Les fragments de végétaux prélevés sont plongés dans un mélange fixateur formé d'acide acétique, de formol et d'acétate de plomb de manière à les fixer cytologiquement (acide acétique - formol) et éviter aussi toute diffusion du phosphore dans la solution car les composés phosphorés solubles en présence d'acétate de plomb forment un sel insoluble. L'inclusion se fait ensuite par passage progressif dans la cire soluble dans l'eau à 25 %, 50 %, 75 %, 100 %. On débute avec la cire à 25 % dans un dessiccateur où l'on fait plusieurs fois le vide pour favoriser la pénétration de la cire dans l'échantillon. Après l'utilisation de cire à 100 %, on inclut dans une cire neuve les fragments de végétaux ayant été convenablement orientés pour les coupes et on laisse se solidifier à la température du laboratoire. Les rubans de coupes obtenus sont étalés sur des lames albuminées ; ces lames sont alors placées sur une platine chauffante. La chaleur fond la cire et les coupes étalées viennent se déposer et se collent sur l'albumine. L'excès de cire est alors enlevé

une première fois par absorption sur du papier Joseph très fin (voir schéma 2). On effectue ensuite une dissolution de la cire et un rinçage final par passage progressif de l'alcool absolu à l'eau pure, l'alcool ayant pour but de renforcer la coagulation de l'albumine, ce qui améliore l'adhérence des coupes sur les lames. Après séchage, ces lames sont prêtes à recevoir l'émulsion liquide.

- Dépôt de l'émulsion :

La dépose de l'émulsion liquide Ilford 15 se fait en chambre noire. Une goutte déposée à l'extrémité de la lame est étalée d'un mouvement régulier à l'aide d'un cylindre en laiton évidé de quelques microns sur une partie de sa longueur de manière à assurer une épaisseur régulière et assez fine d'émulsion sur toute la surface de la lame porte-objet ; le cylindre est guidé sur toute la surface lors de la translation le long de la lame par une collerette de guidage.

Après exposition convenable et développement, nous avons coloré la coupe et procédé au montage entre lame et lamelle ce qui permet d'observer l'autoradiographie sur la coupe.

4-3 / RESULTATS ET DISCUSSION /

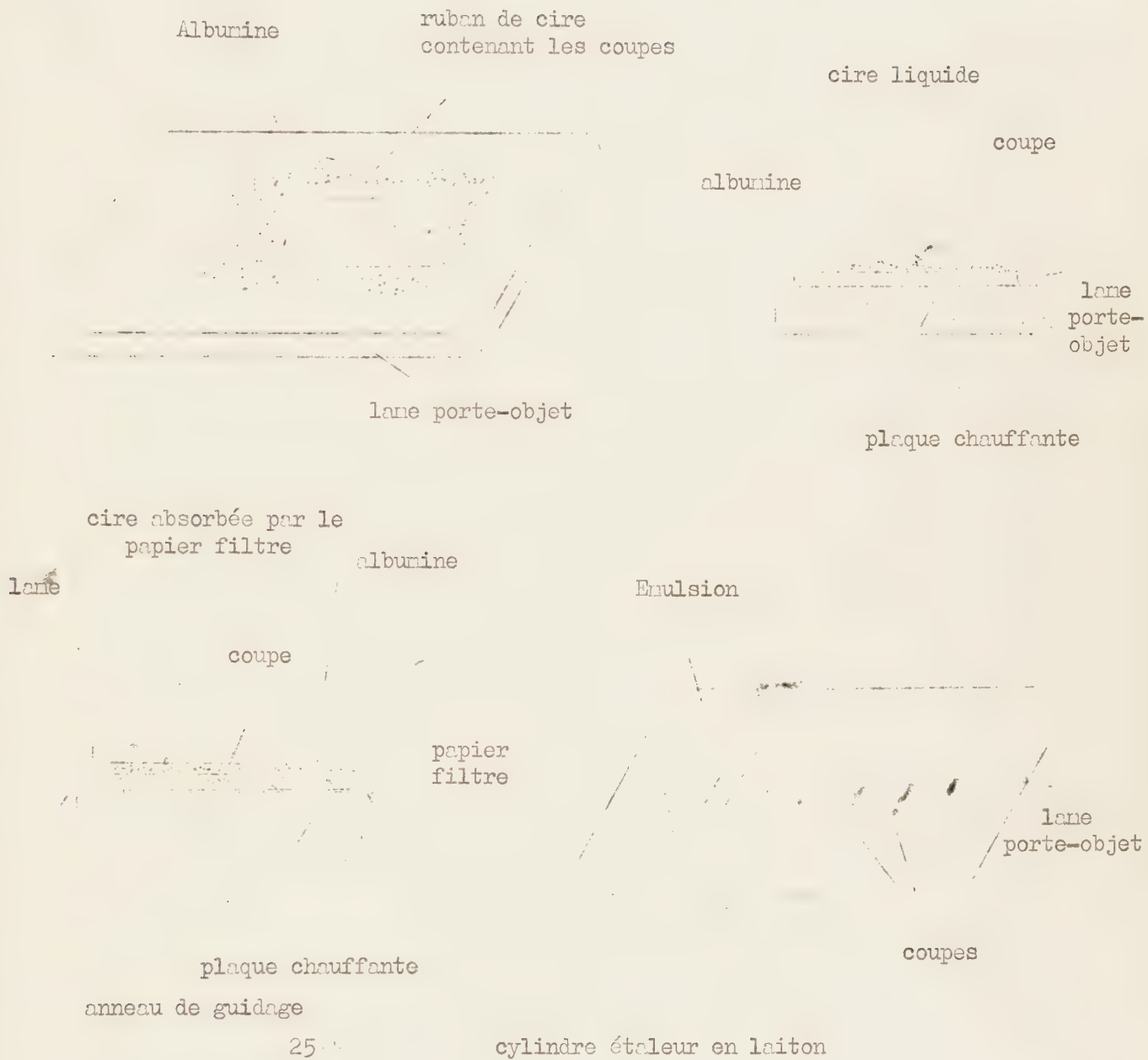
4-3-1 - Etude quantitative des différentes formes de phosphore.

Chaque traitement a été répété trois fois ; en outre, les dosages de phosphore total et la détermination des différentes fractions phosphorées s'effectuent sur trois pieds (un de chaque répétition), les résultats (Tableaux I4 & I5) montrent une bonne concordance entre les dosages de phosphore total et la somme des mesures moyennes obtenues pour les différentes fractions.

4-3-1-1 - Teneur des tissus en phosphore total -

La détermination de la concentration en phosphore total contenu dans les parties aériennes et les racines ne peut donner qu'une idée très approximative de l'influence des trois cations étudiés sur l'absorption du phosphore ; en effet, la présence de ces éléments en excès dans la solution nutritive a pu provoquer une diminution de la

.../...



- SCHEMA 2 - Préparation des coupes en vue de
la microhistoradiographie.

concentration en ions H_2PO_4^- par suite de précipitation. Toutefois, il nous faut mentionner, dans le cas d'un excès de calcium, que la diminution de la concentration en phosphore des racines n'a pas modifié les teneurs en phosphore des parties aériennes. Au contraire, en présence de solutions enrichies en fer ou en aluminium, on constate toujours une baisse en phosphore dans les feuilles, baisse très accentuée dans le cas d'addition d'aluminium.

Dans tous les cas, un apport de phosphore dans la solution nutritive à une dose trois fois plus élevée que précédemment rétablit une teneur normale dans les parties aériennes ; par contre, on remarque des concentrations toujours supérieures dans les racines ; cet accroissement déjà sensible en présence d'aluminium devient encore plus significatif pour le témoin et les deux autres traitements. Ainsi, les variations notées entre les traitements avec une dose normale en phosphore pourraient s'expliquer partiellement par une diminution de la concentration en phosphore des solutions nutritives. Toutefois, on ne peut faire intervenir ce fait pour ce qui est des différences de répartition du phosphore total entre les racines et les parties aériennes.

4-3-1-2 - Répartition du phosphore total en phosphore minéral et organique.

L'étude des différentes fractions phosphorées a permis de montrer l'effet des cations calcium, fer et aluminium sur cette répartition du phosphore dans les tissus végétaux (Tableaux 14 & 15).

4-3-1-2-1 - Influence du calcium -

Ce cation en excès dans la solution nutritive provoque une diminution en phosphore minéral dans les racines ; les teneurs en phosphore organique acido-soluble et acido-insoluble sont identiques au témoin. Il ne semble donc y avoir eu dans ce cas qu'une simple diminution d'absorption permettant toutefois un métabolisme normal.

4-3-1-2-2 - Influence du fer -

Malgré une distribution et des valeurs en phosphore minéral identiques au traitement précédent, le fer provoque dans toute la plante une baisse du phosphore organique, baisse résultant uniquement

de la diminution de la teneur en phosphore organique acido-insoluble, sans perturber les quantités de phosphore organique acido-soluble. Co cation en excès aurait donc une double action :

- accumulation de phosphore minéral comme le montre l'augmentation du rapport $\frac{P \text{ minéral}}{P \text{ organique}}$
- un trouble dans le métabolisme du phosphore organique matérialisé par la modification du rapport $\frac{P \text{ organique acido-soluble}}{P \text{ organique acido-insoluble}}$

4-3-1-2-3 - Influence de l'aluminium -

Les résultats obtenus montrent au niveau des racines une forte rétention de phosphore minéral qui ne migre pas vers les parties aériennes. D'autre part, la transformation de ce phosphore minéral en phosphore organique est très réduite et on note, comme pour le fer, mais uniquement au niveau des racines, une augmentation du rapport $\frac{P \text{ organique acido-soluble}}{P \text{ organique acido-insoluble}}$. Au contraire, dans les feuilles, le peu de phosphore minéral parvenant est fortement assimilé et il n'existe aucun trouble dans l'évolution du phosphore organique.

Le fer et l'aluminium semblent donc perturber l'évolution du phosphore suivant deux processus :

- Immobilisation de phosphore sous forme minérale avec surtout dans le cas de l'aluminium une moindre mobilité de phosphore minéral vers les parties aériennes.

- Augmentation du pourcentage de phosphore organique acido-soluble ; en ce qui concerne l'aluminium, Rorison et Clarkson pensent qu'il y aurait une inhibition de la phosphorylation des hexoses s'effectuant au niveau des sites d'estérification, c'est à dire à la surface des mitochondries ou dans le plasma lui-même ; cette action de l'aluminium serait à rapprocher de la forte affinité de ce cation pour les molécules chargées et en particulier pour les protéines. Clarkson a bien montré que la diminution de la phosphorylation n'est pas due à une diminution de la synthèse d'ATP, mais à une inhibition de l'hexokinase.

4-3-1-2-4 - Par l'apport d'une dose triple de phosphore dans la solution nutritive, on observe des quantités de phosphore orga-

- TABLEAUX XIV ET XV -

Répartition du phosphore total en phosphore
minéral, phosphore organique acido-soluble
et acido-insoluble.

1) Dose normale de Phosphore.

	T		Ca		Fe		Al	
	A	R	A	R	A	R	A	R
Total ‰	7.9	15.5	7.6	12.2	6.8	8.8	4	9.1
P minéral ‰	3.6	9.9	3.6	6.53	3.5	6.9	0.95	8.3
P organique acido-soluble ‰	1.1	0.36	1	0.37	1.1	0.33	0.75	0.17
P organique acido-insoluble ‰	3	5.1	2.8	5	1.9	1.5	2.2	0.6
P minéral	0.88	1.81	0.94	1.21	1.17	3.66	0.32	12.2
P organique								
P organique acido-soluble								
P organique acido-insoluble								
	0.37	0.07	0.36	0.07	0.58	0.2	0.34	0.28

2) Dose Triple de Phosphore.

	T		Ca		Fe		Al	
	A	R	A	R	A	R	A	R
Total ‰	8.2	34	8	36	7.9	35	8.3	27
P minéral ‰	5	26	4.8	27	4.9	27	5.1	20
P organique acido-soluble ‰	0.75	0.6	0.7	0.62	0.73	0.65	0.75	0.6
P organique acido-insoluble ‰	2.3	8.2	2.2	8.1	2.4	8.3	2.1	8
P minéral	1.7	2.95	1.65	3.1	1.56	3.	1.7	2.3
P organique								
P Organique acido-soluble								
P organique acido-insoluble								
	0.32	0.073	0.32	0.077	0.3	0.079	0.36	0.075

A = parties aériennes

R = racines

.../...

ganique identiques dans tous les traitements et une répartition semblable entre les deux formes, acido-soluble et acido-insoluble ; néanmoins, les racines des plantes cultivées en présence d'un excès d'aluminium présentent une teneur en phosphore minéral légèrement plus faible que dans les autres traitements. Une très forte teneur en phosphore dans les solutions nutritives semble donc corriger les phénomènes de toxicité en précipitant, sans doute, les excès de fer et d'aluminium ; ces résultats indiquent la possibilité, dans certains cas, de corriger la toxicité due au fer ou à l'aluminium par une forte augmentation du phosphore assimilable.

4-3-2 - Autoradiographie.

4-3-2-1- Macroautoradiographie -

Deux protocoles expérimentaux ont été adoptés :

4-3-2-1-1- Culture continue pendant trois semaines sur des solutions contenant du phosphore radioactif :

- Solution témoin et solution enrichie en calcium : les clichés relatifs à ces deux traitements ne montrent aucune différence. Les feuilles les plus jeunes présentent une radioactivité maximum avec cependant une teneur en P^{32} encore importante dans les feuilles les plus âgées.
- Solution enrichie en fer ou en aluminium : on note dans ce cas une très forte migration du P^{32} vers les feuilles les plus jeunes, les premières feuilles étant, par contre, peu radioactives.

Nous avons matérialisé ces différences par les clichés de la planche 1.

4-3-2-1-2 - Après trois semaines de culture sur une solution nutritive exempte de phosphore, le végétal est mis en contact pendant une heure avec les solutions correspondant aux divers traitements et dans lesquelles le phosphore est apporté sous forme de KH_2PO_4 marqué par $H_3PO_4^{32}$. Après ce laps de temps, on effectue une autoradiographie sur une première série d'échantillons. Une deuxième série est remise dans

..../...

des solutions contenant cations et phosphore mais celui-ci étant non radioactif ; on effectue alors une seconde autoradiographie des plants 48 heures après.

Après une heure seulement dans la solution nutritive contenant du P^{32} , les plantes des deux traitements (témoin et solution enrichie en calcium) présentent déjà une certaine radioactivité dans les feuilles ; au contraire, chez les plantes des deux autres traitements (fer et aluminium) les feuilles sont assez peu radioactives. Le contraste est beaucoup plus marqué pour les échantillons ayant séjournés quarante huit heures de plus dans une solution non radioactive (Planche 2).

4-3-2-2 - Microhistoradiographie -

De très nombreux clichés ont été examinés et de leur étude comparative nous avons pu préciser la migration du phosphore absorbé.

4-3-2-2-1 - Solution témoin et solution enrichie en calcium :

La diminution de radioactivité dans les racines entre les deux expériences, une heure avec P^{32} et une heure avec P^{32} + 48 h en solution non radioactive, correspond à une augmentation de P^{32} dans les feuilles dans lesquelles le phosphore semble diffuser des vaisseaux vers le parenchyme. Après quarante huit heures dans la solution non radioactive, les racines présentent encore une radioactivité assez nette. On peut également remarquer qu'il semble exister deux barrages à la pénétration du phosphore dans les racines, le premier au niveau de l'épiderme, le second au niveau de l'endoderme (Planche 3).

En outre, dans tous les cas, les coupes faites au niveau des méristèmes terminaux montrent une radioactivité uniforme et très importante.

4-3-2-2-2- Solution enrichie en fer ou en aluminium :

On note dans ce cas une très forte diminution de la radioactivité dans les racines après quarante huit heures de culture

.../...

dans la solution non radioactive. Cependant, au niveau où nous avons effectué les coupes dans les feuilles, l'augmentation de radioactivité se localise principalement dans les vaisseaux conducteurs, le parenchyme étant, lui, peu radioactif (planche 4).

4-3-3 - DISCUSSION

Dans le cas d'un excès de fer ou d'aluminium, la très forte diminution de radioactivité des racines comparée aux résultats des dosages chimiques montrant une accumulation de phosphore dans ces mêmes racines, renforcerait l'hypothèse d'une fixation de phosphore minéral à l'extérieur des cellules. Il est donc possible de penser que l'alumine se déposerait sur les parois cellulaires où le phosphore y serait adsorbé, permettant ainsi une dilution isotopique de ce phosphore avec celui de la solution non radioactive. Ce mécanisme peut être comparé à l'adsorption de phosphore par les hydroxydes d'aluminium des sols. En effet, Clarkson constate qu'une grande partie du phosphore en excès dans les racines des végétaux ayant subi un pré-traitement à l'aluminium s'y trouve sous une forme échangeable.

L'analogie, dans nos conditions expérimentales, des autoradiographies pour le fer et l'aluminium, semble masquer des phénomènes quelque peu différents.

L'accumulation de phosphore minéral en présence d'un excès de fer se manifeste dans toute la plante avec cependant un accroissement du rapport $\frac{P \text{ minéral}}{P \text{ organique}}$ supérieur dans les racines.

A l'opposé, en présence d'un excès d'aluminium, le trouble dans le métabolisme du phosphore est localisé au niveau des racines.

La très forte migration de phosphore vers les feuilles les plus jeunes serait consécutive aux besoins intenses en phosphore de ces organes en pleine croissance ; en effet, dans ces deux cas (trouble dans le métabolisme du phosphore en présence d'un excès de fer, rétention du phosphore au niveau des racines en présence d'un excès d'aluminium) les quantités de phosphore minéral disponibles pour les synthèses organiques sont limitées et la plus grande partie du phosphore migrerait vers ces organes afin de compenser au maximum le déficit.

CONCLUSION

Cette étude avait pour but de rechercher l'influence de trois cations (calcium, fer, aluminium) sur l'absorption et le métabolisme du phosphore au cours du développement de plantules d'orge. En résumé, dans nos conditions expérimentales, il semble possible de souligner les faits suivants :

1) Mise en évidence d'un processus de rétrogradation du phosphore dans la solution nutritive enrichie en l'un ou l'autre des cations étudiés ; cette complexation entraîne la diminution de la teneur en phosphore total des tissus végétaux par rapport à celle des plantes développées sur solution-témoin.

2) Interférence des trois cations sur le métabolisme des plantules d'orge :

- L'ion calcium ne provoque aucune modification dans le métabolisme du phosphore ; en effet, la migration du phosphore minéral et la synthèse de phosphore organique ne semblent nullement affectées par un excès de cet élément.
- La présence d'une grande quantité d'ions ferriques entraîne une accumulation de phosphore minéral dans toute la plante par suite d'un ralentissement de la synthèse des composés organiques acido-insolubles. L'augmentation plus importante du rapport phosphore minéral/phosphore organique s'accroît dans les racines et résulterait d'une rétention externe du phosphore minéral à ce niveau.
- Si l'aluminium entraîne également une perturbation dans la synthèse du phosphore organique, cette dernière ne se manifeste que dans les racines et se traduit par une augmentation du pourcentage des composés organiques acido-solubles. Dans les parties aériennes, on remarque une déficience très nette en phosphore minéral par suite d'une très forte rétention racinaire ; néanmoins, la fraction de phosphore minéral atteignant les parties aériennes subit un métabolisme très important comme en témoigne un rapport phosphore minéral sur phosphore organique de faible valeur (inférieur au témoin).

.../...

PLANCHE I

Macrophotographie de plantules d'orges ayant séjourné trois semaines sur des solutions nutritives contenant du P^{32}



Solution témoin ou solution enrichie en calcium.

Solution enrichie en fer ou en aluminium.

PLANCHE II

Macrohistoradiographie de plantules d'orges ayant séjourné :

FIGURES 1 et 2: 1 h dans une solution contenant du P^{32} ,

FIGURES 3 et 4: 1 h. dans une solution contenant du P^{32} + 48 h dans une solution sans P^{32} .



FIG. 1. — Témoin ou calcium.



FIG. 2. — Fer ou aluminium.



FIG. 3. — Témoin ou calcium.



FIG. 4. — Fer ou aluminium.

Microhistoradiographie de coupes transversales de racines ou de feuilles de plantules ayant séjourné dans une solution témoin ou enrichie en calcium :

FIGURES 1 et 2 : 1 h dans une solution contenant du P^{32} .

FIGURES 3 et 4 : 1 h dans une solution contenant du P^{32} + 48 h dans une solution sans P^{32} .

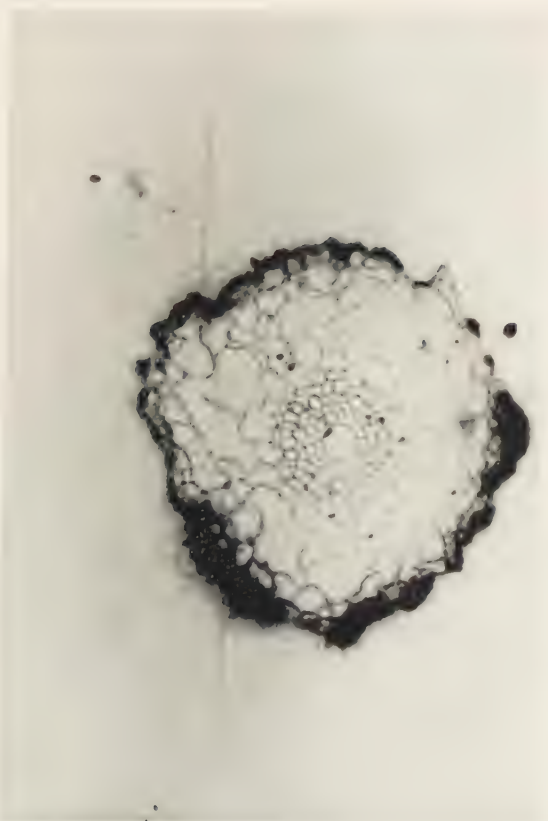


FIGURE 1. — Racine 1 h

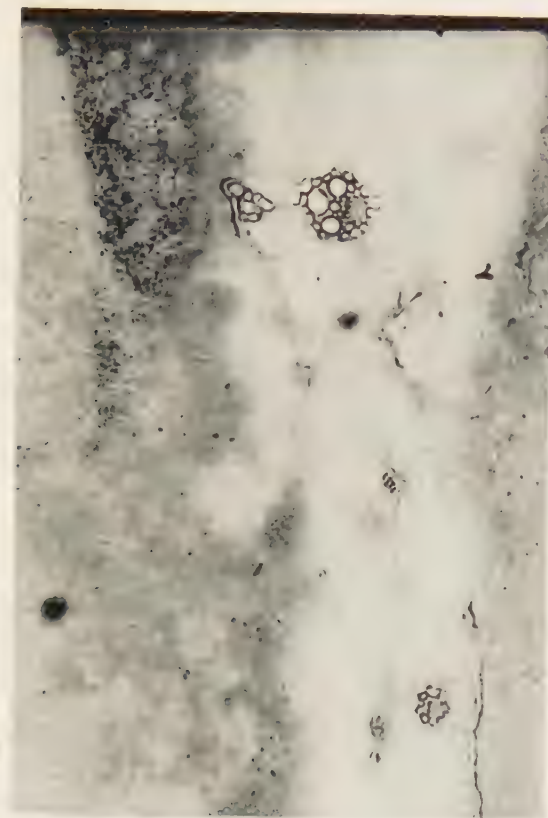


FIGURE 2. — Feuille 1 h.

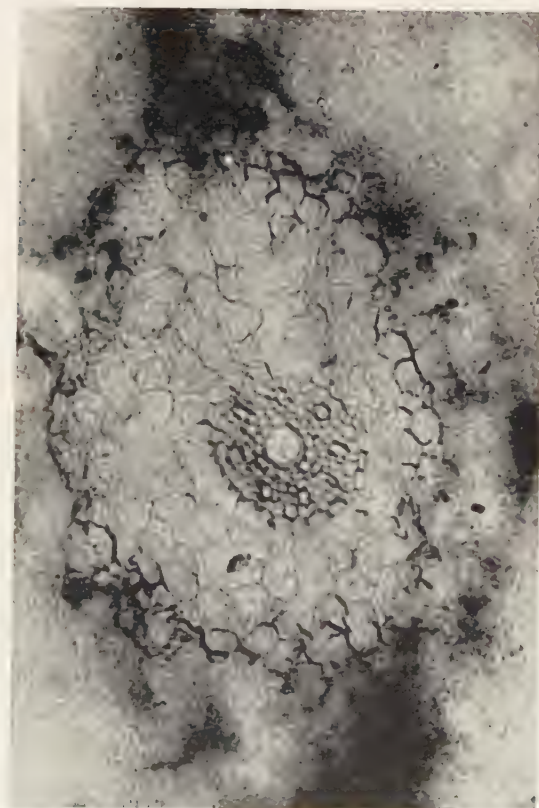


FIGURE 3. — Racine 48 h.



FIGURE 4. — Feuille 48 h.

Microhistoradiographie de coupes transversales de racines ou de feuilles de plantules ayant séjourné dans une solution enrichie en fer ou en aluminium :

FIGURES 1 et 2 : 1 h dans une solution contenant du P^{32} .

FIGURES 3 et 4 : 1 h dans une solution contenant du P^{32} + 48 h dans une solution sans P^{32} .

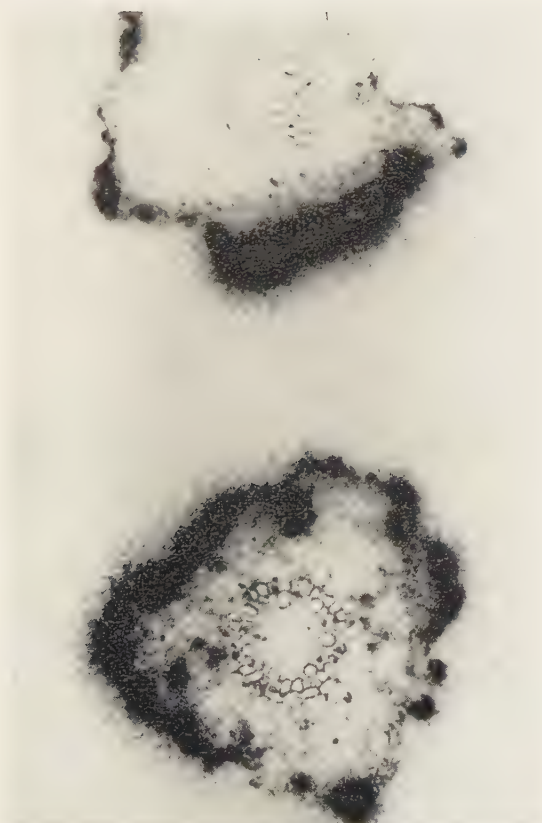


FIG. 1. — Racine 1 h.



FIG. 2. — Feuille 1 h.

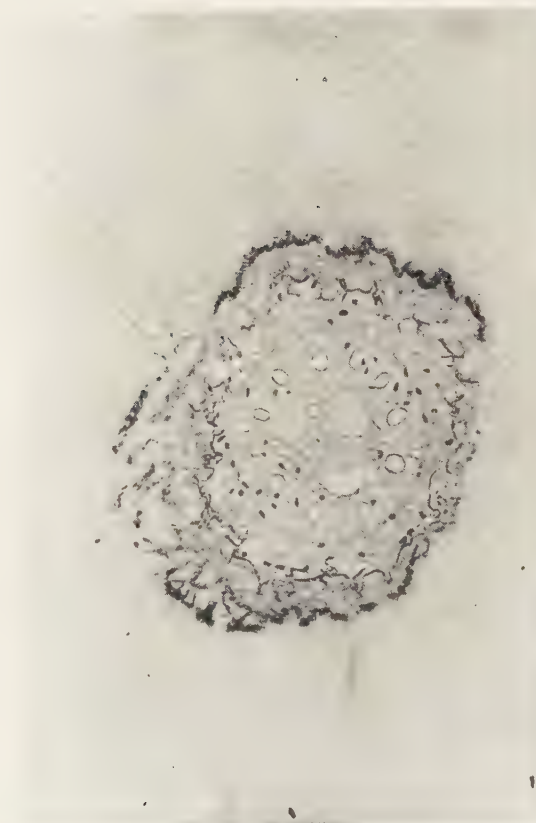


FIG. 3. — Racine 48 h.

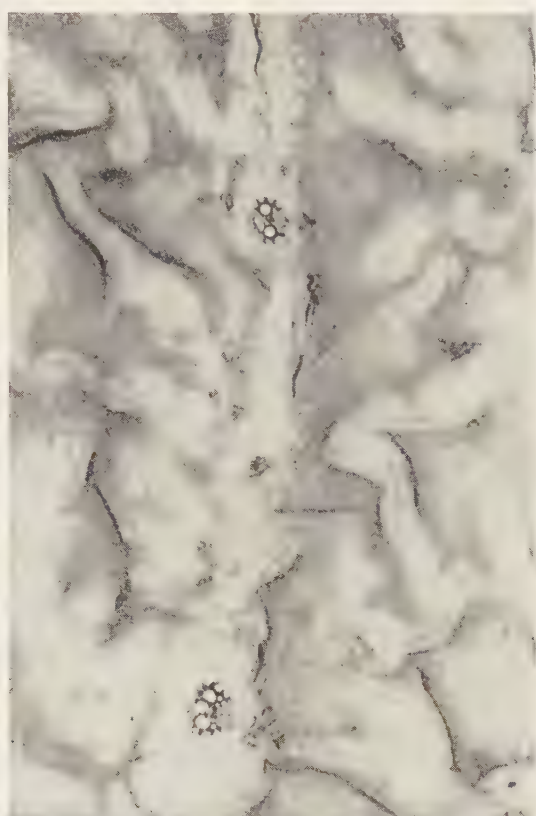


FIG. 4. — Feuille 48 h.

CONCLUSION GENERALE

L'ensemble des résultats exposés montre l'importance du rôle du calcium, du fer et de l'aluminium sur la transformation du phosphore minéral en phosphore organique. Les synthèses effectuées par l'intermédiaire des microorganismes ou des végétaux supérieurs sont en effet affectées par ces cations tant du point de vue quantitatif que qualitatif.

L'étude de l'incorporation microbienne de phosphore minéral radioactif dans des composés organiques semble mettre en évidence une certaine liaison de ces composés avec le reste de la matière organique du sol. Ainsi l'action du calcium, du fer ou de l'aluminium sur la dynamique de ce phosphore organique est très comparable à l'action de ces éléments sur la dynamique des composés humiques.

La nature du phosphore organique provenant des débris de végétaux supérieurs peut également être modifiée par une absorption importante de fer ou d'aluminium.

Du point de vue pratique, notre travail a précisé :

- une méthode de dosage du phosphore assimilable, méthode qui montre la différenciation qu'il y a lieu de faire entre l'influence de l'aluminium échangeable et celle de l'alumine libre quant à la disponibilité, pour les plantes, du phosphore minéral qui est lié à cet élément.

- les phénomènes de toxicité d'un excès de fer ou d'aluminium sur le métabolisme du phosphore dans les plantules d'orge.

- B I B L I O G R A P H I E -

- ABDULBARI (A) - 1964 - Action du chaulage sur l'assimilabilité du phosphore dans les sols de Zamorano.
Soil Sci. Soc. Am. Proc. 28, 672-73.
- AHMAD (M) - 1960 - Aluminium toxicity of certain soils on the coast of british Guiana and problems of their agricultural utilisation.
Trop. Agr. Ind. Sci. Sol. 2, 161-170.
- ANDERSEN (A) - 1961 - Détermination de l'état phosphorique des sols au moyen du phosphore radioactif.
Acta Agric. Scand. 11, 270-290.
- ANDERSON (G) - 1960 - Factors affecting the estimation of phosphate esters in soil.
J. Sci. Ed. Agric. 11, 497-503.
- 1961 - A partial fraction able of alkali soluble soil organic phosphate.
J. Soil Sci. 12, 276-285.
- ANDERSON (C.A.) & BLACK (C.A.) - 1965 - Separation of organic phosphorus in soil extracts by mechanical and chromatographic filtration.
Soil Sci. Soc. Am. Proc. 29, 255-259.
- BAERT (L) - 1963 - Etude de l'état phosphorique des sols au moyen de P^{32} .
Bull. Inst. Agron. Genbloux XXXI, 507-516.
- 1965 - Determination of labile P and P retention of soils using P^{32} .
Meded. Landb hogesch opzoek Stns Gent, 30, 1149-1163.
Soils and fertilizers, 1966, 29, 3.
- BARBIER (G) - 1965 - Contribution à l'étude de l'influence du pH sur la mobilité des ions phosphoriques du sol.
Ann. Agron. 16, 603-623.
- BARBIER (G) & Haas ARPADNE - 1961 - Contribution à l'étude de l'acide phosphorique dans les terres calcaires.
Ann. Agron. 12, 425-433.

- BARBIER (G), LESAINT (M) & TYSZKIEWICZ (E) - 1954 -
recherche au moyen d'isotopes sur les phénomènes
d'autodiffusion dans le sol et sur l'alimentation
des plantes.
Ann. Agron. 6, 923, 59.
- BARROW (N.J) - 1961 - Le phosphore dans la matière organique du sol.
Soils and fertilizers XXIV, 169-173.
- BERENBLUM (I) & CHAIN (E) - 1938 -
Biochem. J, 32, 295.
- BLACK (C.A) & GORING (C.A.I) - 1953 -
Organic phosphorus in soils.
Agron. 4, 123-152.
- BLANCHET (R) - 1960 - Adsorption et dilution isotopique des ions phos-
phoriques au contact des hydroxydes métalliques
et des argiles.
Ann. Agron. 11, 55-74.
- 1961 - Les sols et les problèmes agronomiques de Cham-
pagne berrichonne.
Bull. Ass. Franc. Et. Sol. 3, 115-120.
- 1962 - Alimentation phosphorique des plantes et phéno-
mène de contact racines-particules du sol.
Ann. Agron. 13, 21-29.
- BLANCHET (R) & CHAUMONT (C) - 1964 -
Quelques aspects de la désorption et des mouvements
d'ions phosphoriques dans le sol.
Ann. Agron. 15, 519-538.
- BLANCHET (R), CROUZET (C), STUDER (R), et CHAUMONT (C) - 1963 -
Premières indications sur la dynamique du phos-
phore dans les sols calcaires de Champagne berri-
chonne.
C.R. Acad. Agric. Fr. 305-317.
- BLANCHET (R), MORIZET (J), CHAUMONT (C), MAERTENS (C) - 1965 -
Quelques exemples de l'utilisation d'un engrais
phosphaté radioactif pour l'étude de l'alimentation
phosphorique des plantes dans le sol.
Ann. Agron. 16, 535-551.

- BLANCHET (R), STUDER (R) & CHAUMONT (C) - 1963 -
Appréciation détaillée du niveau phosphorique des
sols par des techniques simples.
C.R. Acad. Agric. FR. 49, 256-263.
- BOSWALL (G.W) & DELONG (W.A.) - 1959 -
The use of 8-Hydroxyquinoline in the extraction of
soil organic phosphorus.
Canad. J. Soil Sci. 39, 20-26.
- BOWER (C.A) - 1945 - Separation and identification of phytin and
derivatives from soil.
Soil Sci. 59.
- BRUMFIELD (S.M) - 1965 -
Studies of the relative importance of iron and
aluminium in the sorption of phosphate by some
Australian soils.
Aust. J. Soil. Res. 3, 31,44.
- CALDWELL (H.C) & BLACK (C.A) - 1958 -
Inositol hexaphosphate.
Soil Sci. Soc. Am. Proc. 22, 4.
- CARPENTIER (L.J) - 1956 -
Compte-rendu des études sur l'emploi d'isotopes
radioactifs dans la recherche agronomique.
Bull. de Documentation ISMA, 20, 73-86.
- CHANG (S.C) et CHU (W.K) - 1961 -
Le sort des engrais phosphatés solubles appliqués
au sol.
J. Soil Sci. 286-93.
- CHANG (S.C) & JACKSON (M.L) - 1957 -
Fractionation of soil phosphorus.
Soil Sci. 84, 133-144.
- CLARKESON (D) - 1966 - Effect of Al on the uptake and metabolism of P^{32}
by barley seedling.
Plant physiol, 41, 165-72.
- COOKE (I.J) - 1966 - A kinetic approach to the description of soil
phosphate status.
J. Soil Sci. 17, 56-64.

- BOSGROVE (D.J) 1963 - The chemical nature of soil organic phosphorus.
Aust. J. Soil Res. 1, 203-214.
- DIOSVIDAL (R), BROYER (T.C) - 1962 -
Effecto de niveles altos de magnesio en la absorcion del aluminio y en el crecimiento del maiz en soluciones de cultivo.
Ann. Edafol. Fisiol. Veget. 21, 13-30.
- DORMAAR (J.F) - 1963 - Humic acid associated phosphorus in some soils of Alberta.
canad. J. Soil Sci. 43, 235-40.
- DUCHAUFOR (Ph) - 1964 -
Sur la dynamique de l'aluminium dans les sols podzoliques.
C.R Acad. Sci. 250, 3307-3309.
- 1965 Précis de Pédologie. MASSON & Cie;
- DUCHAUFOR (Ph) & BONNEAU (M) - 1959 -
Une méthode nouvelle de dosage du phosphore assimilable dans les sols forestiers.
Bull. A.F.E.S. 4, 193, 198.
- DUCHAUFOR (Ph), JACQUIN (F) - 1963 -
Recherche d'une méthode d'extraction et de fractionnement des composés humiques contrôlée par l'électrophorèse.
Ann. Agron. 14, 885-918.
- DUNBAR (A.D) & BAKER (D.E.) - 1965 -
Emploi de la dilution isotopique dans une étude des fractions de phosphore minéral de différents sols.
Soil Sci. Soc. Am. Proc. 29, 259-62.
- DUTHION (C) et CHRISTIEN (J) - 1966 -
Evolution des caractères analytiques de quelques sols forestiers en cours de podzolisation dans les basses Vosges.
Science du sol 2, 15-28.
- FISKEILL (J.G.A) & SPENCER (W.F) - 1964 -
Formes de phosphates dans un sable fin de Lakeland après six ans d'applications massives d'engrais phosphatés et de chaux.
Soil Sci. 97, 320-7.

- FOURCASSIE (F) - 1964 - Essai factoriel : doses P_2O_5 × formes d'engrais
× amendements.
B.A.F.E.S. 12, 455-466.
- FOX (R.L.) - 1962- Phosphorus solubility and availability to plants
and the aluminium status of Hawaiian soils as
influenced by lining.
Trans. Joint Meet. Conn. IV et V Internat. Sty
Soil Sci. New Zeal. , 574- 583.
- FOY (C.D.) et BROWN (J.C.) - 1964 -
Toxic factors in acid soils. II: Differential alu-
minium tolerance of plant species.
Soil Sci. Soc. Am. Proc., 28, 27-32.
- FRIED (H) et DEAN (L.A.) - 1952-
A concept concerning the measurement of available
soil nutrient.
Soil Sci. , 73, 263-271.
- GACHON (L.) - 1966- Phosphore isotopiquement diluable et pouvoir fi-
xateur des sols en relation avec la croissance des
plantes.
C.R. Acad. Agric. Fr., 15, 1108- 1116.
- GORING (C.A.I.) - 1955 -Biological transformation of phosphorus in soil.
Plant and Soil, 6, 17-44.
- GORSHKOV (P.A.) et BILYK (M.V.) - 1966 -
L'influence de l'utilisation prolongée des engrais
sur les formes de phosphates dans les sols podzo-
lizés gris foncés.
Agrokhimiya SSSR, 7, 9-19.
- GRINDEL (N.M.) et ZYRIN (N.G.) - 1965 -
Method of determination and the dynamics of organic
phosphorus compounds in the plow horizon of slight-
ly cultivated sod.
Soviet Soil Sci., 1393-1401.
- HANOTIAUX (G.)-1964- Studies on the dynamics of P and K in soil
Pedologie, Gand, 160-178.
- HARRAP (F.E.G.) - 1963- Use of EDTA in the determination of soil organic
phosphorus.
J. Soil Sci., 14, 82-87.

- HUMPHREYS (F.R), TRUMAN (R) - 1964 -
aluminium and phosphorus requirements of
pinus radiata.
Plant and soil, 20, 131, 134.
- HANCE (R.J) & ANDERSON (G) - 1963 -
Identification of hydrolysis products of
soil phospholipids.
Soil Sci. 96, 157-61.
- JACKMAN (RH) - 1954 - Organic phosphorus in New Zealand soils under
pasture : I Conversion of applied phosphorus
into organic.
Rukyia soil research station, HAMILTON, NEW
ZEALAND.
- JACKMAN (R.H) et BLANK (C.A) - 1951 -
Solubility of iron, aluminium, calcium, and
magnesium inositol phosphates at different
pH values.
Soil Sci. 72, 179-186.
- JELENIC (D) et VAJNBERGER (A) - 1964 -
Isotopically exchangeable phosphorus in soils.
Zemlj. Biljka, 13, 47(57).
Soils and Fertilizers 1966, 29, I
- JOHN (M.K) SPROUT (P.N) KELLEY (CC.) - 1965 -
The distribution of organic phosphorus in
British columbia soils.
Canad. J. Soil. Sci. 45, 87-95.
- JOHNSON (R.E.) JACKSON (W.A) - 1964 -
Calcium uptake and transport by wheat seedling
as affected by aluminium.
Soil Sci. Soc. Am. Proc. 28, 381-386.
- JUSTE (C) - 1965 - Contribution à l'étude de la dynamique de
l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest
atlantique.
Thèse présentée à la Faculté des Sciences de
Nancy.
- KAILA (A) - 1963 - Organic phosphorus in finnish soils.
Soil Sci. 95, 38-44.

- LARSEN (S) - 1952 - The use of P^{32} in studies on the uptake of phosphorus by plants.
Plant and Soil, 4, 1-10.
- 1965 - Vitesse d'immobilisation du phosphate appliqué suivant les propriétés du sol.
J. Soil Sci. 16, 141-8.
- LARSEN (S), GUNARY (D) et SUTTON (C.D.) - 1965 -
The rate of immobilization of applied phosphate in relation to soil properties.
J. Soil Sci. 16, 141-148.
- LEGG (J.O) et BLACK (C.A.) - 1955 -
Determination of organic phosphorus in soils.
II. Ignition method.
Soil Sci. Soc. Am. Proc. 19, 139-143.
- LIEBIG (G.F) VANSELOW (A.P) CHAPMAN (H.D) - 1942 -
Effects of aluminium on copper toxicity as revealed by solution culture and spectrographic studies of citrus.
Soil Sci. 53, 341-351.
- MANNING (P.B) et SALOMON (M) - 1965 -
Formes de phosphate dans le sol après une fertilisation de longue durée.
Soil Sci. Soc. Am. Proc. 29, 421-3.
- MANOJLOVIC (S) - 1965 - Contribution à l'étude du rôle des acides humiques sur la fixation du phosphore soluble dans le sol.
Zemljiste i Biljka 14, 25-35.
Bull. de documentation ISMA 1967, 46,62.
- MARTIN (J.K) - 1964 - Soil organic phosphorus.
New Zeal. J. Agric. Res. 7, 723-760.
- MARTIN (J.K) et WICKEN (A) - 1966 -
Soil organic phosphorus
New Zeal. J. Agric. Res. 9, 529-535.
- MAYAUDON (J) et SIMONART (P) - 1964 -
Assimilation de l'orthophosphate P^{32} par les microbes du sol.
Annales de l'Institut Pasteur 107, 188-196.

- MEHRA (N.C.) LEGG (J.O.) GORING (C.A.I.) BLANK (C.A.) - 1954 -
Determination of organic phosphorus in soils :
I : Extraction method.
Soil Sci. Soc. Am. Proc. 18; 443-449.
- NEHRING (K.) et WIESEMULLER (W.) - 1966 -
Mineral fertilizing and humus economy of arable
soils.
Albrecht. J. Agr. Arch. 10, 379-400 ; 455-470.
- NYE (P.M.) et BERTHEUX (M.H.) - 1957 -
The distribution of phosphorus in forest and
savannah soils of the gold coast and its agricul-
tural significance.
J. Agr. Sci. 49, 141-159.
- ORTLEPP (H.) - 1964 -
Action du mélange super-phosphate-fumier sur la
physiologie des plantes.
Landwirtsch. Forsch XVII, 178-88.
- PARKASH (V.) SUBBIAH (B.V.) - 1965 -
Répartition du P^{32} dans les plantules de citrus
dans des conditions de déficience ou de toxicité
en divers oligo-éléments.
Soil Sci. Plant Nut. Tokyo II, 1-8.
- PRATT (P.F.) - 1963 -
Organic phosphorus in some lacustrine and allu-
vial soils of California.
Soil Sci USA 96, 289-291.
- RANDALL (P.J.) et VOSE (P.B.) - 1963 -
Effect of aluminium on uptake and translocation
of phosphorus by perennial rye-grass.
Plant physiol. 38, 403-409.
- RENNIE (B.A.) et SPRATT (P.D.) - 1962 -
Factors affecting and significance of A. Value.
Radioisotopes in soil plant nutrition studies,
329-342.
- RIS (J.) - 1963 -
Improvement of the availability of soil phosphate
by application of farmyard manure.
Soils and fertilizers, XXVI, 309.
- RORISON (H.I.) - 1964 -
The effect aluminium on the uptake and incorpo-
ration of phosphate by excised sainfoin roots.
Botany Department, The University, SHEFFIELD 10.

- RUSSEL (R.S) - 1959 - The value of measurements of isotopic dilution in the study of soil plant relation ships.
Z. Pfl. Ernähr. Düng. 84, 63-75
- SAINI (G.R) & MAC LEAN (A.A.) - 1965 -
Capacité de rétention du phosphore de quelques sols du Nouveau Brunswick.
Canad. J. Soil Sci. 45, 15-18.
- SAUNDERS (W.M.H) - 1965 -
Rétention du phosphate dans des sols de Nouvelle Zélande.
New Zeal. J. Agric. Res. 8, 30-57
- SEN GUPTA (M.B) & CORNFIELD (A.H) - 1962 -
Lephosphore dans les sols calcaires. II. Dosage du phosphore organique.
J. Sci. Food Agric. 655-658.
- TALIBUDEEN (O) & ARAMBARRI (P) - 1964 -
Influence de la quantité et de l'origine du carbonate de calcium sur le phosphate isotopiquement échangeable en sol calcaire.
J. Agric. Sci. 61, 93-97
- TAYLOR(A.W) et GURNEY (E.L) - 1965 -
The effect of line on the phosphate potential and resin extractable phosphate in five acid soils.
Soil Sci. Soc. Am. Proc. 29, 482-483
- THOMPSON (L.M) BLACK (C.A) & ZOELLNER (J.A.) - 1954 -
Occurence and mineralization of organic phosphorus in soils.
Soil Sci. 77, 185-196.
- VIRMANI (S.M), MOULINIER (H) & MAZOYER (R) - 1966 -
Contribution à l'étude de méthode de dosage de l'acide phosphorique assimilable des sols.
Ann. Agron. 17, 143-155
- WILD (A) & OKE (O.L) - 1966 -
Organic phosphorus compounds in calcium chlorid extracts of soils.
J. Soil Sci. 17, 356-371.

ZAIKOVA (L.A) & MASLOVA (I.Y.A) - 1965 -

Group composition of phosphates of gray forest
soils and leached chernozem.

Izb. Sib. Otd. Akad. Nauk. 555 R. N° 8, Ser.
biol. med. Nauk 2,38-43.

TABLE DES MATIERES

	page
1- INTRODUCTION	1
2- DETERMINATION DU PHOSPHORE ASSIMILABLE	3
2-1 Rappels bibliographiques :	
- Etat du phosphore minéral	3
- Méthodes de dosage du phosphore assimilable	5
- Utilisation du P ³²	7
2-2 Méthodes et matériel :	
- Protocole expérimental	13
- Méthodes de dosage	14
- Sols utilisés	17
2-3 Résultats et discussion	23
Conclusion	36
3- IMMOBILISATION BIOLOGIQUE DU PHOSPHORE	37
3-1 Rappels bibliographiques :	
- Dosage du phosphore organique	37
- Nature du phosphore organique du sol.	38
- Relations entre les teneurs en phos- phore organique des sols et certaines de leurs caractéristiques	39
3-2 Immobilisation du phosphore par la microflore du sol	40
- Etude quantitative	41
- Etude qualitative	45
Conclusion	46

4- ETUDE DE L'INFLUENCE DU CALCIUM, DU FER ET DE L'ALUMINIUM SUR LE METABOLISME DU PHOSPHORE AU COURS DU DEVELOPPEMENT DE PLANTULES D'ORZEE	51
4-1 Rappels bibliographiques sur l'influence du fer et de l'aluminium sur le métabolisme du phosphore	51
4-2 Techniques :	
- Composition de la solution nutritive .	53
- Dosage du phosphore	54
- Autoradiographie	55
4-3 Résultats et discussion	57
Conclusion	65
CONCLUSION GENERALE	66
BIBLIOGRAPHIE	67





